

Ergonomiegestützte Multiagentensimulation von Montageprozessen im Baubetrieb

Entwurf und Erprobung eines Vorgehensmodells
für die Modellierung, Experimentation und den Datenaustausch

Vom Fachbereich Bauingenieurwesen und Geodäsie
an der Technischen Universität Darmstadt
zur
Erlangung des Grades eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)
genehmigte

D i s s e r t a t i o n

vorgelegt von

Dipl.-Ing. Matthias Bergmann

aus Mannheim-Neckarau

Darmstadt, im Dezember 2010

D17

Herausgeber:

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Christoph Motzko

Anschrift:

Technische Universität Darmstadt

Institut für Baubetrieb

El-Lissitzky-Straße 1

64287 Darmstadt, Germany

Internetadresse: www.baubetrieb.tu-darmstadt.de

Bergmann, Matthias:

Ergonomiegestützte Multiagentensimulation von Montageprozessen im Baubetrieb

Darmstadt, Schriftenreihe des Instituts für Baubetrieb, D 55

ISBN 978-3-941925-05-2

Erstreferent:

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Christoph Motzko

Technische Universität Darmstadt

Institut für Baubetrieb

Korreferent:

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Jürgen Schwarz

Universität der Bundeswehr München

Institut für Baubetrieb (BauV8)

Tag der Einreichung: 01. Juli 2010

Tag der Disputation: 03. Dezember 2010

Vorwort des Erstreferenten

Die Unikatfertigung im Bauwesen ist mit der Einmaligkeit der Planung sowie der Einmaligkeit der Produktionsprozesse verbunden. Daher ist die Beprobung von Bauobjekten auf der Grundlage von Prototypfertigungen nur in Ausnahmefällen möglich. Umso wichtiger ist es für das Bauwesen, Werkzeuge zu kreieren, die eine Vorwegnahme und damit gekoppelte Visualisierung der komplexen organisatorischen und technologischen Strukturen in Vorfeld der eigentlichen Produktion ermöglichen. Mit Hilfe rechnergestützter Simulationstechnologien ist die Durchführung solcher Probeläufe möglich. Simulationstechnologien werden in der stationären Industrie verwendet. Der Einsatz in der Bauwirtschaft hat bisher nur im sehr geringen Umfang stattgefunden, obwohl die Potentiale erheblich scheinen. An dieser Stelle setzt die von Herrn Dipl.-Ing. Mathias Bergmann vorgelegte Dissertation „Ergonomiegestützte Multiagentensimulation von Montageprozessen im Baubetrieb“ an. Im Rahmen der Arbeit wird ein ontologiebasiertes und ergonomiegestütztes Vorgehen zur Multiagentensimulation von Montageprozessen im Bauwesen entwickelt.

Die Idee von Herrn Bergmann besteht in der Entwicklung eines zweistufigen Simulationsmodells, welches in der ersten Stufe die agentenbasierte Modellierung als Standardprozess verwendet, um in der zweiten Stufe, bauprojektbezogen, Experimente mit unterschiedlichen Eingangswerten im Sinne einer Variantenuntersuchung zu ermöglichen. Herr Bergmann koppelt dabei die Baubetriebswissenschaften einschließlich der ergonomischen Aspekte mit der Bauinformatik.

Am Beispiel der Montageprozesse einer modularen Fassadenbekleidung wird das entwickelte Vorgehensmodell zur Anwendung gebracht. Die Anwendung des Vorgehensmodells an einem konkreten Beispiel stellt die Vollständigkeit und Viabilität der entwickelten Struktur unter Beweis. Der Anwendungsfall stellt im wissenschaftlichen Sinne den Versuch einer Falsifizierung dar. Im Ergebnis wird konstatiert, dass die entwickelte Struktur der wissenschaftlichen Überprüfung standhält.

Die von Herrn Dipl.-Ing. Mathias Bergmann vorgelegte Dissertation „Ergonomiegestützte Multiagentensimulation von Montageprozessen im Baubetrieb“ liefert einen sehr interessanten und wertvollen Beitrag im Komplex des Bauprozessmanagements. Die Arbeit interpretiert neu den Ergonomiekomplex in der Definition von Bauproduktionsprozessen unter Anwendung der Methoden der Bauinformatik. Herr Bergmann hat weiterhin im Rahmen seiner Arbeit am Institut für Baubetrieb der TU Darmstadt einen wichtigen Beitrag zur Formulierung der hier entwickelten Ontologie für Baubetriebswissenschaften geleistet. Im Ergebnis wird ein Vorgehensmodell entwickelt, welches eine präzisere Modellierung von Bauprozessen ermöglicht. Für diese Leistung danke ich dem Verfasser.

Darmstadt, im Dezember 2010

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Christoph Motzko

Danksagung des Verfassers

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Baubetrieb der Technischen Universität Darmstadt. Die positive Atmosphäre dort hat mir immer wieder Energie und Mut für die Forschungsarbeit gegeben.

Mein großer Dank gilt Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. Christoph Motzko, der meine Promotion als Doktorvater begleitet hat. Seine Vorschläge haben meine Forschung bereichert und ich konnte mir stets seiner Unterstützung sicher sein. Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. Jürgen Schwarz danke ich für die konstruktiven Anregungen im Rahmen des Korreferats.

Bei allen Kolleginnen und Kollegen möchte ich mich für die gute und freundschaftliche Zusammenarbeit bedanken. Jede und jeder einzelne hat dazu beigetragen, dass ich meine Zeit am Institut stets in bester Erinnerung behalten werde. Besonderer Dank gilt Oliver und Erik mit denen ich im Rahmen der Forschung zur Ontologie viele wertvolle Ideen erarbeitete. Ebenso bin ich Dr.-Ing. Jörg Klingenberg für seine präzisen Analysen und Hinweise zur Struktur dankbar.

Auch möchte ich all meinen Freunden - insbesondere Christofer, Patrick, Björn und Montiel - dafür danken, dass sie stets an meiner Seite waren, wenn ich sie brauchte.

Von ganzem Herzen Danke ich meinen Eltern, meiner Schwester, meiner Oma, meinem Opa und Udo für Ihre Unterstützung, ohne die diese Dissertation kaum entstanden wäre.

Lampertheim, im Dezember 2010

Matthias Bergmann

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis.....	I
1 Einleitung	1
1.1 Grundlagen der Forschungsarbeit.....	1
1.1.1 Motivation und Praxisproblem	1
1.1.2 Ziele der Arbeit	3
1.1.3 Vorgehen in der Forschung und Aufbau der Arbeit	6
1.1.4 Eingrenzung.....	9
1.2 Baubetrieblicher Hintergrund	10
1.2.1 Montageprozesse im Bauwesen.....	11
1.2.2 Arbeitsvorbereitung für die Montage	14
1.2.3 Kontrolle und Steuerung von Montageprozessen im Bauwesen	16
2 Informationstechnische Grundlagen für die agentenbasierte Simulation und den Informationsaustausch im Baubetrieb	19
2.1 Agentenbasierte Simulation für den Baubetrieb	19
2.1.1 Simulation	19
2.1.1.1 Klassifikation von Simulationen	21
2.1.1.2 Vorgehen bei der Simulation	22
2.1.1.3 Qualitätsmanagement in der Simulation	24
2.1.2 Agenten in der Informatik.....	27
2.1.2.1 Das Konzept des autonomen Software-Agenten	27
2.1.2.2 Multiagentensysteme.....	30
2.1.2.3 Kommunikation unter Agenten	32
2.1.3 Multiagentensimulation	34
2.1.3.1 Charakteristika der Multiagentensimulation.....	35

2.1.3.2	Werkzeuge für die Multiagentensimulation	37
2.2	Eine systemoffene Schnittstelle für den Informationsaustausch im Baubetrieb	40
2.2.1	Beschreibung einer geeigneten Schnittstelle	41
2.2.2	Ontologien in der Informatik	43
2.2.2.1	Formate und Strukturen der Ontologien	43
2.2.2.2	Vorgehensweise und Werkzeuge zur Erstellung von Ontologien	46
2.2.3	Werkzeuge zum Arbeiten mit OWL-Ontologien	50
2.2.3.1	Transformationsmechanismen	50
2.2.3.2	Anfragesprachen	51
2.2.4	Die Ontologie der Baubetriebswissenschaften	53
3	Arbeitswissenschaftliche Grundlagen für das agentenbasierte Bauablaufmodell	55
3.1	Arbeitswissenschaftliche Aspekte der Terminplanung im Baubetrieb	55
3.2	Systemische Analyse von Bauprozessen	57
3.2.1	Das Arbeitssystem	57
3.2.2	Struktur und Bestimmung von Zeitwerten	58
3.3	Einflüsse der Ergonomie auf Terminpläne des Baubetriebs	60
3.3.1	Das Belastungs-Beanspruchungsmodell	60
3.3.2	Ermüdung und Erholung von Arbeitskräften	62
3.3.3	Ergonomische Aspekte des Leistungsangebots von Arbeitskräften	63
3.3.4	Modellierung der menschlichen Leistung im Baubetrieb	65
3.4	Kritik an den ergonomischen Modellen aus Sicht der Bauablaufmodellierung	67
4	Vorgehensweise zur Modellierung des Bauablaufs mit Agenten und Ontologien	69
4.1	Agentenbasierte Modellierung für die Bauindustrie	69

4.1.1	Analyse bestehender Vorgehensmodelle hinsichtlich eines Einsatzes in der Bauindustrie	69
4.1.2	Modellierungsschritte und ihre Zusammenhänge.....	71
4.2	Aufstellen eines baubetrieblichen, agentenbezogenen Arbeitssystems für Montagearbeiten	72
4.2.1	Aufstellen eines Arbeitssystems der Montage und Logistik.....	72
4.2.2	Übertragung der Elemente des REFA-Arbeitssystems in ein Multiagentenmodell.....	74
4.3	Agentenbasiertes Leistungs-Ermüdungsmodell für Vorgabezeiten	77
4.3.1	Modell der Leistung und Ermüdung von Arbeitskräften	77
4.3.2	Parameter des Leistungs-Ermüdungsmodells	81
4.3.2.1	Quantifizierung der Teilbelastungen	82
4.3.2.2	Quantifizierung der Eigenschaften	84
4.3.2.3	Übersicht der ergonomischen Parameter	88
4.3.3	Integration in das agentenbezogene Arbeitssystem	89
4.3.4	Gegenüberstellung arbeitswissenschaftlicher Konzepte und deren Abwandlung im Leistungs-Ermüdungsmodell	91
4.4	Abbildung des Bauablaufs in einem baubetrieblichen Multiagentenmodell	92
4.4.1	Modellierung des Arbeitsablaufs als Agentenverhalten	94
4.4.1.1	Spezifikation des Verhaltens von Monteur- und Transportagenten.....	94
4.4.1.2	Implementierung des Verhaltens der Agenten bei der Montage	96
4.4.2	Schema der Kooperation und Kommunikation von Agenten	98
4.4.2.1	Spezifikation der Kooperations- und Kommunikationsschemata	99
4.4.2.2	Implementierung der direkten Agentenkommunikation	102
4.4.3	Modell der Baustelle und der Anlieferung	103
4.4.3.1	Spezifikation der Simulationsumwelt	103
4.4.3.2	Implementierung der Ressourcen und des Umweltagenten	105
4.4.4	Abbildung der Ergonomie und zugehöriger Einflussfaktoren	106
4.4.4.1	Spezifikation des ergonomischen Modells für Agenten.....	107
4.4.4.2	Implementierung der Ergonomie in den Agenten und deren Umwelt.	108
4.4.5	Erweiterung des Aktivitätsdiagramms	109
4.4.5.1	Spezifikation von Pausen- und Zusatztätigkeiten	109
4.4.5.2	Implementierung der zusätzlichen Aktivitäten	110

4.5	Qualitätssicherung bei der Aufstellung eines baubetrieblichen Multiagentenmodells	111
4.5.1	Kontinuierliche Qualitätssicherung bei der agentenbasierten Modellierung des Bauablaufs.....	111
4.5.2	Sensitivitätsanalyse des agentenbasierten Bauablaufmodells.....	114
4.5.3	Verifikation und Validierung des agentenbasierten Bauablaufmodells.....	116
4.5.3.1	Ermittlung und Analyse der Tätigkeitsdauern bei minimaler Belastung.....	117
4.5.3.2	Justierung der Standardbeanspruchung.....	119
4.5.3.3	Validierung bei Extrembeanspruchungen	120
4.5.3.4	Überprüfung der Zusatztätigkeiten	123
4.5.4	Fazit zur Qualitätssicherung	125
4.6	Entwicklung einer Ontologie zur semantischen Abbildung der Simulationsergebnisse.....	126
4.6.1	Einordnung innerhalb der baubetrieblichen Ontologien	126
4.6.2	Terminologie einer Simulationsontologie	128
4.6.3	Informationsaustausch der Simulation per Ontologie.....	130
4.7	Eigenschaften des ergonomiegestützten Multiagentenmodells der Bauabläufe.....	134
5	Vorgehen bei der Anwendung der Multiagentensimulation zur Planung und Steuerung von Montageprozessen.....	137
5.1	Einsatz der agentenbasierten Simulation in der Bauindustrie.....	137
5.1.1	Vorgehensweise und Anwendungsfälle der Multiagentensimulation	138
5.1.2	Standardisierung des Datenaustauschs.....	140
5.2	Baubetriebliche Vorgehensweise zur agentenbasierten Bauablaufprognose in der Arbeitsvorbereitung	141
5.2.1	Aufstellen von Szenarien des Ressourceneinsatzes und der Baustellenrandbedingungen bei Montagearbeiten.....	142
5.2.1.1	Umweltparameter für die Szenarien	144
5.2.1.2	Individuelle ergonomische Eigenschaften der Arbeitskräfte	147
5.2.2	Durchführung und Auswertung der Simulationsexperimente	147
5.2.2.1	Aufbereitung der Daten aus den Simulationsläufen.....	149

5.2.2.2	Bereitstellung und Nutzbarkeit der Simulationsergebnisse für die Optimierung.....	151
5.2.2.3	Möglichkeiten der Risikoanalyse auf Basis von Daten aus der Simulation.....	152
5.2.2.4	Festlegung von Planwerten basierend auf den Simulationsergebnissen.....	153
5.2.3	Bereitstellung der Termin-Plan-Daten und deren Parameter.....	154
5.3	Nutzung der Multiagentensimulation für die Kontrolle und Steuerung des Baufortschritts	155
5.3.1	Erzeugung von Soll-Daten zum Baufortschritt.....	156
5.3.1.1	Definition des Soll-Baufortschritts bezüglich der Ergonomie	156
5.3.1.2	Ermittlung des Soll-Baufortschritts per Simulationsexperiment aus Baustellen Ist-Daten	157
5.3.2	Erstellung von Prognosen zum zukünftigen Baufortschritt.....	158
5.3.2.1	Prognose des Baufortschritts basierend auf dem aktuellen Kenntnisstand.....	159
5.3.2.2	Prognose der Auswirkungen von Steuerungsmaßnahmen.....	159
5.3.3	Durchführung des Plan-Soll-Ist-Prognose-Vergleichs.....	160
5.3.3.1	Bereitstellung und gezieltes Abrufen der Daten zum Baufortschritt....	162
5.3.3.2	Nutzung der Daten zum Baufortschritt.....	163
6	Anwendungsbeispiel: Simulation der Montage einer modularen Fassadenbekleidung.....	165
6.1	Überprüfung des Vorgehensmodells anhand eines Anwendungsbeispiels	165
6.2	Vorstellung des Fassadensystems.....	166
6.3	Stufe 1: Aufstellen eines baubetrieblichen Multiagentenmodells der Fassadenmontage	169
6.3.1	Modellbildung entsprechend dem Vorgehensmodell.....	169
6.3.2	Systematische Qualitätssicherung des Modells der Fassadenmodulmontage.....	172
6.4	Stufe 2: Simulation der Montagearbeiten im Rahmen der Arbeitsvorbereitung für eine Fassadenmontage	180
6.4.1	Aufstellung der Szenarien	181

6.4.2	Experimentation und Aufbereitung der Daten	182
6.4.3	Datenanalyse zur Optimierung und Risikobewertung.....	184
6.4.4	Festlegung von Plan-Werten und Bereitstellung der Simulationsergebnisse in einer Ontologie.....	188
6.5	Stufe 2: Anwendung der Multiagentensimulation für die Kontrolle und Steuerung einer Fassadenmontage	189
6.5.1	Erzeugung von Soll- und Prognose-Daten zum Fortschritt der Fassadenmontage.....	190
6.5.2	Plan-Soll-Ist-Prognose-Vergleiche und Maßnahmenauswahl	192
6.5.3	Ontologiebasierter Informationsaustausch	194
6.6	Bewertung des Vorgehens im Anwendungsbeispiel	195
6.6.1	Fazit zum Vorgehensmodell der Montageprozessmodellierung	196
6.6.2	Bilanz zur Anwendung der Verifikation, Validierung und Justierung des Multiagentenmodells.....	198
6.6.3	Bewertung des Einsatzes der Multiagentensimulation für die Arbeitsvorbereitung.....	199
6.6.4	Fazit zur Nutzung der Simulation als Werkzeug der Kontrolle und Steuerung des Baufortschritts.....	201
7	Fazit	203
7.1	Bewertende Zusammenfassung.....	203
7.2	Ausblick	210

Glossar wichtiger IT-Begriffe	213
Abbildungsverzeichnis.....	216
Tabellenverzeichnis	221
Formelverzeichnis	223
Abkürzungsverzeichnis.....	224
Quellenverzeichnis	226

Kapitel 1

Einleitung

1.1 Grundlagen der Forschungsarbeit

1.1.1 Motivation und Praxisproblem

Modulare Systeme mit einem hohen Vorfertigungsgrad werden in der Bauindustrie aufgrund hoher Lohnkosten, steigender Komplexität und wachsender Qualitätsanforderungen weiter an Bedeutung gewinnen. Wobei nicht nur klassische Fertigteile des Rohbaus aus Stahl, Holz oder Verbundwerkstoffen betrachtet werden sollten, sondern auch Module in der Technischen Gebäudeausrüstung und bei der Fassade sowie modulare, wiederverwendbare Systeme in der Schalungstechnik.

Die Verwendung vorgefertigter Systeme beim Bauen erfordert auf der Baustelle Montageprozesse und eine zugehörige Baulogistik. Die Planung der Leistungserstellungsprozesse auf Baustellen erfolgt im Rahmen der Arbeitsvorbereitung durch das ausführende Bauunternehmen. Von zentraler Bedeutung ist dabei die Termin- und Ressourcenplanung, damit Arbeitskräfte, Baugeräte und Baustoffe zur richtigen Zeit in der erforderlichen Menge am richtigen Ort zur Verfügung stehen.¹ Dazu benötigt die Arbeitsvorbereitung Hilfsmittel zur Bestimmung des Baufortschritts unter Berücksichtigung der eingesetzten Ressourcen, äußeren Einflüsse und technologischen Abhängigkeiten. Software zur Unterstützung der Termin- und Ressourcenplanung in der Arbeitsvorbereitung von Bauprojekten sollte insbesondere den Vergleich einer Vielzahl von Varianten des Bauablaufs weitgehend

¹ Vgl. Bauer (2007): Baubetrieb, S. 165

automatisieren und damit überhaupt erst ermöglichen. Hierzu sind herkömmliche Programme zur Termin- und Ressourcenplanung kaum in der Lage, da sie keine automatische Iteration zum Ressourceneinsatz oder gar Varianten des Bauverfahrens erstellen können.²

Im Laufe der Bauausführung kommt es regelmäßig zu Abweichungen von der ursprünglichen Planung. Zur Einhaltung der unternehmerischen Ziele sind daher die Leistungserstellungsprozesse auf der Baustelle zu kontrollieren und zu steuern. Eine effektive Bauprozesssteuerung erfordert den zeitnahen Vergleich von Soll- und Ist-Daten sowie die unverzügliche Auswahl von Steuerungsmaßnahmen. Dennoch erfüllen die heute eingesetzten Controllingsysteme diese Forderung nicht.³

Für die Planung, Kontrolle und Steuerung der Termine und Ressourcen von Leistungserstellungsprozessen auf Baustellen benötigt man ein Modell der Leistung von Arbeitskräften. Die Arbeitswissenschaften haben Modelle aufgestellt, um die Einflüsse auf die Arbeitsleistung von Menschen zu beschreiben. Zugleich ist es heute üblich, die Arbeitsleistung weitgehend unabhängig von den konkreten Randbedingungen bei der Ausführung einer Tätigkeit abzubilden. Die Erkenntnisse der Arbeitswissenschaften zur Leistung von Arbeitskräften in Abhängigkeit von ergonomischen Einflussgrößen werden in der Baupraxis nur selten genutzt, da der erforderliche Mehraufwand als zu hoch angesehen wird.⁴

Die Informatik hat Technologien entwickelt, um den Ablauf von Prozessen auf Basis eines Modells im Rechner nachzubilden. Die rechnergestützte Simulation der Leistungserstellungsprozesse ermöglicht die Vorhersage des Ablaufs der Prozesse bei unterschiedlichen Randbedingungen mit Hilfe der Computersimulation.⁵ Eine rechnergestützte Simulation des Bauablaufs berechnet selbstständig den Baufortschritt für Varianten des Ressourceneinsatzes und unterschiedlicher Randbedingungen. Damit kann die Bauablaufsimulation zu einer Verbesserung der Effizienz und Effektivität der Arbeitsvorbereitung und Bauprozesssteuerung beitragen.

In der Baupraxis werden Simulationen des Bauablaufs dennoch selten eingesetzt, da der Aufwand zur Modellierung eines Bauprojektes als zu hoch eingestuft wird und eine Wiederverwendung des Modells aufgrund des Unikatcharakters von

² Vgl. Charour (2006): CAD und Simulation im Erdbau, S. 19

³ Vgl. Girmscheid, Motzko (2007): Kalkulation und Preisbildung in Bauunternehmen, S. 108 f.

⁴ Vgl. Haide (2007): [...] Quantifizierung der Einflüsse auf Vorgangsdauern [...], S. 4

⁵ Vgl. Franz (2007): Vorwort zum 1. IBW-Workshop – Simulation in der Bauwirtschaft

Bauwerken schwierig ist.⁶ Insbesondere sehen viele Vorgehensmodelle zur Simulation vor, dass eine Gruppe von Spezialisten die Simulation im Rahmen eines eigenständigen Simulationsprojektes als Ganzes durchführt.⁷ Dies ist im Rahmen der Arbeitsvorbereitung schwer vorstellbar, da meist nur eine kurze Zeitspanne zur Verfügung steht, vielfältige Abhängigkeiten bestehen und die Planungen durch erfahrene Baubetriebsexperten durchzuführen sind.⁸

Für die Arbeitsvorbereitung und Bauprozesssteuerung wird daher eine Bauablaufsimulation benötigt, die mit geringem Aufwand an unterschiedliche Bauprojekte anpassbar ist. Zur detaillierten Berücksichtigung von Leistungsunterschieden aufgrund veränderlicher Umwelt-, Baustellen- und Personaleinflüsse auf den Baufortschritt sollte ein Modell zur ergonomisch fundierten Bestimmung der Arbeitsleistung in das Simulationsmodell des Bauablaufs integriert werden. Damit wäre es möglich, die Potentiale der Simulation und Ergonomie für den Baubetrieb zu erschließen.

Die zeitnahe Bauprozesssteuerung erfordert den Austausch und die Auswertung der Daten zum Baufortschritt mittels Computersystemen und geeigneter Software-Werkzeuge. Der Informationsaustausch zwischen den Projektbeteiligten und deren Software wird heute durch proprietäre Datenformate erschwert. Die Erfassung und der Austausch von Daten und Informationen über den geplanten und tatsächlichen Bauablauf werden durch Insellösungen und fehlende Austauschformate bei der Bausoftware behindert. Notwendig ist die Schaffung eines offenen Austauschformats, das möglichst viele Daten über das Bauwerk und dessen Errichtung in einer allgemeinen Struktur abbilden kann.

1.1.2 Ziele der Arbeit

Das Ziel dieser Arbeit ist es, die Planung, Kontrolle und Steuerung der Termine und Ressourcen für die Bauausführung durch Einsatz der Simulationstechnik effizienter und effektiver zu gestalten sowie den Informationsaustausch über Bauprozesse zu verbessern. Dabei wird der ganzheitliche Ansatz, den Motzko für die

⁶ Vgl. Kugler, Franz (2007): Entwurf eines multiagentenbasierten Referenzmodells für Simulationen im Hochbau, S. 70 ff.

⁷ Vgl. VDI 3633 (12/1993): Simulation von Logistik-, Materialfluß- und Produktionssystemen, S.9 f.

⁸ Vgl. Scholz (2009): Praxisanforderungen an Simulationswerkzeuge im Baubetrieb, S. 67 ff.

Schalungseinsatzplanung formuliert hat⁹, mit Fokus auf die Termin- und Ressourcenplanung für Montageprozesse weiterentwickelt. Dazu soll der Bauablauf in einem individuenbasierten Simulationsmodell abgebildet und die Ergonomie als Faktor für die Leistung von Arbeitskräften in das Bauablaufmodell integriert werden.

Um die Anwendung einer solchen ergonomiegestützten Multiagentensimulation im Bauwesen zu unterstützen, soll ein zweistufiges Vorgehensmodell entwickelt werden, das die Besonderheiten der Bauausführung und ihrer Planung, Kontrolle und Steuerung berücksichtigt. Die Baubetriebsexperten in der Arbeitsvorbereitung und Bauprozesssteuerung benötigen zur effizienten Durchführung von Simulationsexperimenten ein lauffähiges Modell, das einfach an ein konkretes Bauprojekt angepasst werden kann. Zugleich sind Abläufe zu definieren, wie die Simulationsergebnisse auszuwerten und zu nutzen sind.

Die Simulation zur Planung, Kontrolle und Steuerung des Bauablaufs muss aufgrund des Unikatcharakters jedes Bauprojekts in der Lage sein, unterschiedliche Randbedingungen flexibel und realitätsnah abzubilden und ein heterogenes Raummodell besitzen. Dabei sind ergonomische Einflüsse auf die Arbeitsleistung in das Modell zu integrieren, um die Leistung der Arbeitskräfte dynamisch und individuell abbilden zu können. Die Berücksichtigung dieser Einflüsse ermöglicht eine effektivere Termin- und Ressourcenplanung sowie Bauprozesssteuerung, da eine detailliertere Bestimmung und Analyse der Arbeitsleistung möglich wird.

Eine individuenbasierte Simulation kann diese Anforderungen erfüllen, da die dort eingesetzten selbstständigen Entitäten in der Lage sind, dynamisch auf ihre Umwelt zu reagieren und so Randbedingungen und Kooperationen adaptieren respektive nachbilden können. Somit könnte die bisherige statische Abbildung des Bauablaufs im Netzplan durch ein individuenbasiertes Simulationsmodell ersetzt werden. Ein solches Modell bietet die Möglichkeit zur dynamischen Bestimmung der Arbeitsleistung und überprüft während dem Simulationslauf die Einhaltung von technologischen respektive geometrischen und kapazitiven Abhängigkeiten bzw. Randbedingungen.

⁹ Vgl. Motzko (1990): Ein Verfahren zur ganzheitlichen Erfassung und rechnergestützten Einsatzplanung moderner Schalungssysteme, S. 76 ff.

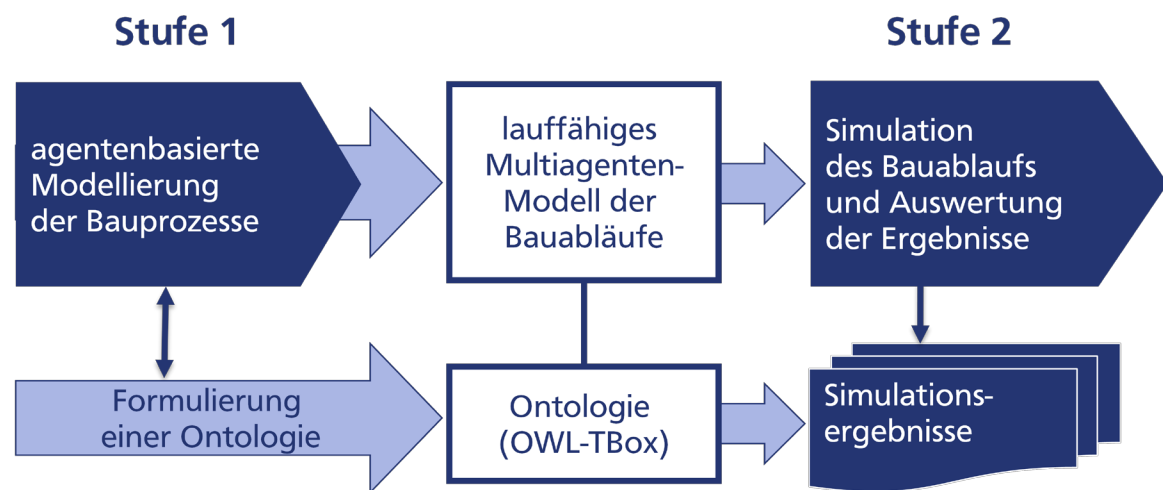


Abbildung 1: Konzept für ein zweistufiges Vorgehensmodell zur Implementierung eines Multiagentenmodells und zur Einbindung der Ergebnisse in Ontologien

Wie in Abbildung 1 dargestellt, generiert die Modellierung der Bauprozesse in der ersten Stufe ein lauffähiges Modell der Bauabläufe. Dieses wird in der zweiten Stufe eingesetzt, um den Bauablauf zu simulieren und die Simulationsergebnisse auszuwerten. Parallel zur Modellierung und Simulation wird eine Ontologie für den automatisierten Austausch von Informationen entwickelt und genutzt.

Die erste Stufe des Vorgehensmodells stellt Techniken und Modelle bereit, um bestehendes baubetriebliches und arbeitswissenschaftliches Wissen in das Multiagentenmodell zu integrieren. Diese können von Simulationsexperten genutzt werden, um ein Simulationsmodell des Bauablaufs zu implementieren. Von zentraler Bedeutung ist die Transformation des REFA-Arbeitssystems in ein Multiagentenmodell sowie die Modellierung und Integration von Vorgabezeiten basierend auf Aufwandswerten und einer detaillierten Betrachtung der Leistungsfähigkeit von Arbeitskräften. Außerdem ist ein umfassender Ansatz zur Sicherung der Qualität erforderlich.

In der zweiten Stufe wird die Vorbereitung, Durchführung und Auswertung von Simulationsexperimenten für unterschiedliche Zwecke im Rahmen der Planung, Kontrolle und Steuerung von Terminen und Ressourcen beschrieben. Dazu nutzen Baubetriebsexperten das Simulationsmodell aus der ersten Stufe für Simulationsexperimente zum Bauablauf. In der Arbeitsvorbereitung wird die Nutzung der neuen Möglichkeiten durch den Vergleich vieler Varianten und Randbedingungen dargestellt. Für die Kontrolle und Steuerung des Baufortschritts soll die schnelle Verfügbarkeit von Berechnungen zum Baufortschritt auf Basis von Ist-Daten genutzt werden.

Die Ontologie dient als offenes, semantisches Austauschformat für den Informationsaustausch zwischen Softwaresystemen zur Planung, Kontrolle und Steuerung von Bauprozessen. Parallel zur ersten Stufe der Bauablaufsimulation wird eine einheitliche Ontologie auf Basis der Ontologie für die Baubetriebswissenschaft entworfen, die dann während der zweiten Stufe mit Daten gefüllt wird.

Der Fokus des Vorgehensmodells für die agentenbasierte Bauablaufsimulation und die Einbindung einer Ontologie liegt dabei auf der baubetrieblichen Anwendung. Es werden weder neue Grundlagen im Bereich der Informatik entwickelt noch neue ergonomische Erkenntnisse angestrebt. Vielmehr sollen die Erkenntnisse und Techniken anderer Fachdisziplinen für baubetriebliche Anwendungen nutzbar gemacht werden.

1.1.3 Vorgehen in der Forschung und Aufbau der Arbeit

Das Ziel jeder wissenschaftlichen Arbeit ist die Gewinnung neuer Erkenntnisse und neuen Wissens. In den Ingenieurwissenschaften geht es dabei um technologischen Fortschritt und die Lösung praktischer Probleme. Dabei besteht das von der Philosophie diskutierte Problem, wonach aufgrund der eingeschränkten Wahrnehmbarkeit und Erfassbarkeit der Realität keine absolute Wahrheit gefunden werden kann. Diese wissenschaftstheoretische Problematik ist allerdings aus Ingenieurssicht nicht maßgebend.¹⁰ Vielmehr lässt sich die Wissenschaftlichkeit im Bereich des Ingenieurwesens erreichen, indem definierte Anforderungen an wissenschaftliche Forschung erfüllt werden.

Als Anforderungen an die Wissenschaftlichkeit sind die intersubjektive Nachvollziehbarkeit sowie Falsifizierbarkeit des Vorgehens und der Ergebnisse von grundlegender Bedeutung. Dazu ist ein strukturiertes Vorgehen im Rahmen der Forschung und dessen Dokumentation erforderlich. Werden die Vorgehensweise und die Ergebnisse publiziert, so ist die Forderung nach intersubjektiver Nachvollziehbarkeit erfüllt.¹¹ Um falsifizierbar zu sein, muss es prinzipiell möglich sein zu beweisen, dass die im Rahmen einer wissenschaftlichen Arbeit getroffenen Aussagen falsch sind. Zudem sollte ein Wissenschaftler vor Veröffentlichung seiner Forschungsergebnisse versuchen, diese selbst zu widerlegen.¹²

¹⁰ Vgl. Motzko et al (2010): Eine Ontologie für die Baubetriebswissenschaft

¹¹ Vgl. Kornmeier (2007): Wissenschaftstheorie und wissenschaftliches Arbeiten, S. 47 ff.

¹² Vgl. ebenda, S.40 ff.

Um die Vorgehensweise intersubjektiv nachvollziehbar zu machen, ist in Abbildung 2 die Struktur des Vorgehens im Rahmen dieser Arbeit abgebildet und soll hier begründet und erläutert werden.



Abbildung 2: Schema zum strukturierten Vorgehen während der Forschungsarbeit

Ein wesentlicher Ausgangspunkt der Forschung in der Baubetriebswissenschaft sind Praxisprobleme, die unter anderem aus der Literatur und Expertengesprächen oder durch Vergleiche zwischen Baupraxis und stationärer Industrie identifiziert werden. Basierend auf Ideen zur Problemlösung ist daraufhin eine Analyse zum Stand der Forschung und den wissenschaftlichen Grundlagen im Umfeld der Problemlösungsidee anzufertigen. Dabei sind Muster zu erkennen, Konzepte zu definieren und Kategorien zu bilden.

Die gewonnenen Erkenntnisse werden im nächsten Schritt in eine Lösung des Praxisproblems projiziert. Dabei werden die Grundlagen verknüpft, eine Lösung abgeleitet und diese umfassend und für Dritte nachvollziehbar formuliert. Als Ergebnis der Theoriebildung ist im Rahmen dieser Arbeit das Vorgehensmodell entstanden. Dort wird zunächst beschrieben, wie Montageprozesse auf Baustellen sowie deren Dauer und Ergonomie in einem ergonomiegestützten Multiagentenmodell abgebildet werden können. Danach wird dargestellt, wie es möglich ist, mit Hilfe der Multiagentensimulation die Planung, Kontrolle und Steuerung von Montageprozessen zu verbessern.

Zuletzt ist diese Lösung hinsichtlich ihrer Anwendbarkeit, Richtigkeit und ihres Nutzens zu überprüfen. Da es sich hier bei der Problemlösung um ein Vorgehensmodell handelt, werden das Vorgehen und die Hilfsmittel anhand eines Beispiels

erprobt. Ist das Vorgehen nicht wie beschrieben möglich oder sind die Hilfsmittel unzureichend, so wäre das Vorgehensmodell falsifiziert.

Aus dem in Abbildung 2 dargestellten Schema zum Vorgehen im Rahmen der Forschung wurde die Struktur dieser Arbeit abgeleitet. Wie in Abbildung 3 dargestellt ist, werden nach der Einleitung zunächst die Grundlagen in Bezug auf das Vorgehensmodell erläutert. Danach werden die beiden Stufen des Vorgehensmodells beschrieben. Das Vorgehensmodell wird dann anhand eines Anwendungsbeispiels verwendet und hinsichtlich seiner Anwendbarkeit und seines Nutzens bewertet. Zum Schluss folgen eine bewertende Zusammenfassung und ein Ausblick auf künftige Forschungsfelder.

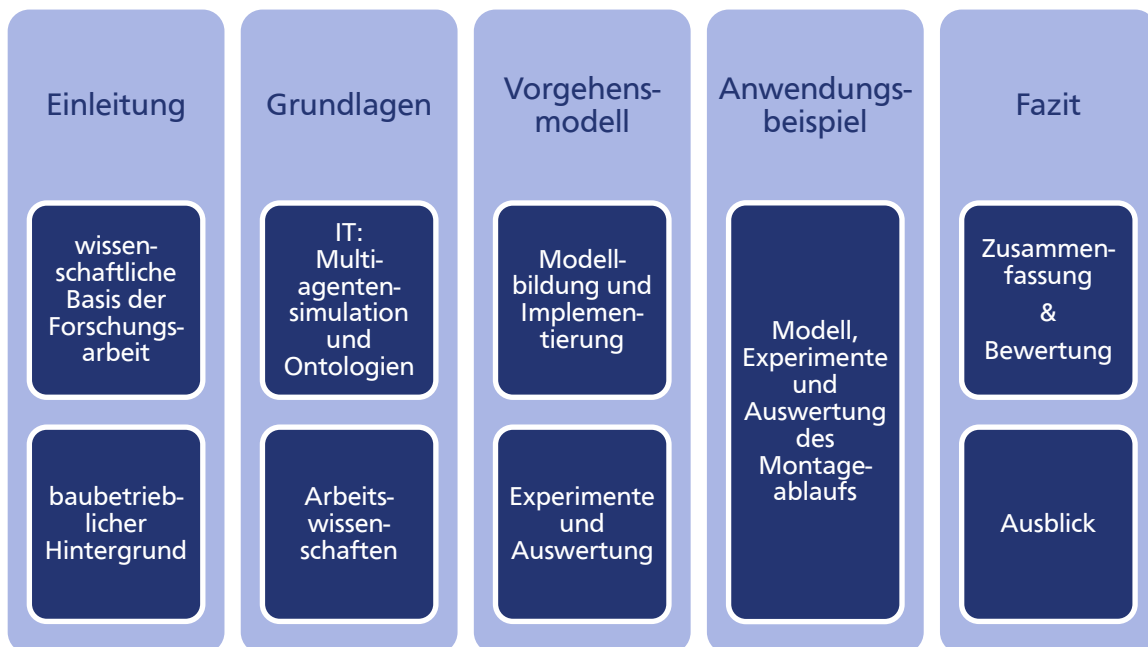


Abbildung 3: Gliederung dieser Forschungsarbeit

Im Rahmen der Einleitung wird der wissenschaftliche und baubetriebliche Hintergrund der Arbeit erläutert. Dies sind die Prozesse der Termin- und Ressourcenplanung sowie die Kontrolle und Steuerung von Montageprozessen während der Bauzeit. In Kapitel 2 werden die informationstechnischen Grundlagen dargestellt. Zunächst wird die Simulation und das Agentenkonzept in der Informatik erläutert und die Multiagentensimulation vorgestellt. Danach wird die Ontologie als Basis für die Interoperabilität von Softwaresystemen beschrieben und ihr Einsatz im Hinblick auf die Bauablaufsimulation erläutert. Kapitel 3 umfasst dann die arbeitswissenschaftlichen Grundlagen, auf denen das Multiagentenmodell des Bauablaufs fußt. Dazu werden zum einen die im Baubetrieb üblichen Techniken nach REFA in Bezug auf die Simulation dargestellt und die wichtigsten ergonomischen Modelle vorgestellt.

Im Kapitel 4 werden zunächst die Grundlagen aus Abschnitt 1.2 sowie den Kapiteln 2 und 3 genutzt, um die Modellierung der Montageprozesse auf Baustellen unter Berücksichtigung ergonomischer Aspekte zu beschreiben. Dabei geht es um das Vorgehen zur Erstellung eines lauffähigen Multiagentenmodells und dessen Verifikation und Validierung. Im Anschluss wird die Formulierung einer TBox der Ontologie auf Basis der Theorie aus Abschnitt 2.2 erläutert. Im Kapitel 5 werden die Grundlagen aus Abschnitt 1.2 aufgegriffen, um die Anwendung des entsprechend Kapitel 4 erstellten Multiagentenmodells zu strukturieren. Hierbei geht es darum, die Möglichkeiten der ergonomiegestützten Multiagentensimulation im Vergleich zu herkömmlichen Techniken der Termin- und Ressourcenplanung zu analysieren. Abschließend wird im Kapitel 6 die Montage einer modularen Fassadenbekleidung entsprechend Kapitel 4 modelliert und das Modell entsprechend Kapitel 5 für die simulationsbasierte Planung, Kontrolle und Steuerung der Montageprozesse genutzt.

1.1.4 Eingrenzung

In dieser Arbeit wird ein Vorgehensmodell für die agentenbasierte Simulation von Montageprozessen auf Baustellen entwickelt, das die ergonomischen Aspekte der Leistung von Arbeitskräften integriert und offene Austauschformate nutzbar macht. Dabei werden bestehende Simulationswerkzeuge genutzt, um das Vorgehensmodell bezüglich seiner Umsetzbarkeit zu überprüfen. Die Entwicklung oder Erweiterung von Simulationssoftware ist nicht Gegenstand dieser Arbeit. Zugleich wird kein für den Praxiseinsatz geeignetes Simulationsmodell entwickelt, sondern die Methodik zur Modellierung eines solchen Bauablaufmodells beschrieben.

Der Fokus des Vorgehensmodells liegt auf der Planung, Kontrolle und Steuerung von Prozessen auf der Baustelle hinsichtlich Terminen und Ressourcen. Das heißt, die Systemgrenze eines entsprechenden Simulationsmodells entspricht der Baustellengrenze, weshalb beispielsweise die Herstellung und Anlieferung von Fertigteilen nur als Eingabe berücksichtigt werden. Zudem werden zunächst die Termine, der Baufortschritt und die eingesetzten Ressourcen untersucht und Aspekte der Kosten oder Qualität nur am Rande betrachtet. Im Kern geht es dabei um Montageprozesse, bei denen vorgefertigte Elemente durch Arbeitskräfte zusammengefügt werden. Folglich steht die Leistungsfähigkeit menschlicher Arbeitskräfte und nicht die Geräteleistung im Zentrum.

Während die dynamische Modellierung der Umwelteinflüsse und Arbeitskräfte eine wichtige Komponente des Vorgehensmodells darstellt, werden Geometriedaten als statische Randbedingungen betrachtet. Die Umsetzung einer CAD-Schnittstelle bzw. die Möglichkeiten zur effizienten Einbindung der Bauwerks- und Baustellengeometrie werden daher nicht untersucht. Zur Integration von Ge-

ometriedaten aus Bauwerksinformationsmodellen in ein agentenbasiertes Simulationsmodell wird auf laufende baubetriebliche Forschungsarbeiten an der Universität Kassel verwiesen.¹³

Wichtig ist auch hervorzuheben, dass die Simulation im Rahmen des Vorgehensmodells die Optimierung oder Steuerung der Bauprozesse nicht selbstständig durchführt, sondern die hierfür erforderlichen Daten erzeugt und bereitstellt. Die Agenten, die im Simulationsmodell die Arbeitskräfte abbilden, sind reflexbasiert und haben weder explizite Ziele noch die Fähigkeit zum planmäßigen Handeln. Vielmehr führen sie basierend auf ihrer Wahrnehmung vorgegebene Handlungsmuster aus. Diese Modellierung erlaubt eine flexible Bauablaufsimulation, deren Ergebnisse Menschen oder höher entwickelte Agenten als Grundlage für Optimierungs- und Steuerungsentscheidungen nutzen können.

1.2 Baubetrieblicher Hintergrund

Die Anwendung der Multiagentensimulation für die Planung, Kontrolle und Steuerung von Montageprozessen stellt den baubetrieblichen Hintergrund dieser Forschungsarbeit dar. Leistungserstellungsprozesse auf Baustellen müssen geplant, kontrolliert und gesteuert werden. Nur so kann sichergestellt werden, dass die Bauausführung die an sie gestellten Anforderungen hinsichtlich Qualitäten, Terminen und Kosten erfüllt.

Die Planung ist das systematische Durchdenken zukünftiger Handlungen und dient der Festlegung von Zielen sowie Wegen zur Zielerreichung. Sie ist ein integraler Bestandteil des Controllings und eng mit der Kontrolle verknüpft. Für die Ablaufplanung, die unter anderem die Planung von Terminen und Ressourcen umfasst, werden die Zusammenhänge der Prozesse zur Erstellung eines Bauwerks modelliert. Sie lässt sich in mehrere Detaillierungsgrade untergliedern. Häufig wird der Grobterminplan mit der Einheit Wochen oder Monate sowie der Koordinationsterminplan mit der Einheit Arbeitstage im Rahmen der Arbeitsvorbereitung erzeugt und im Zuge der Bauausführung durch detaillierte Ablauf- oder Taktpläne ergänzt.

Die Kontrolle umfasst im weiteren Sinne den Vergleich von Soll- und Ist-Werten, die Abweichungsanalyse sowie die daraus resultierenden Entscheidungen. Im engeren Sinne meint Kontrolle das Vergleichen geplanter und realisierter Kenngrö-

¹³ Vgl. Kugler (2009): Prozessdatenmodell für die Simulation im Hochbau

ßen. Für beide Bedeutungen ist das Konzept der Kontrolle vom Konzept des Controllings, unter dem ein deutlich breiteres Aufgabenfeld zusammengefasst wird, zu unterscheiden.

Unter Steuerung versteht man die gerichtete Beeinflussung eines Systems von außen. Die Steuerung ist von der Regelung zu unterscheiden, bei der sich ein System mittels Rückkopplung selbst beeinflusst. Die termin- und ressourcenbezogene Bauprozesssteuerung dient der Beeinflussung von Bauprozessen hinsichtlich ihres Fertigstellungstermins bzw. Baufortschritts durch ein Steuerungselement, das sich außerhalb des Systems zur Ausführung des Bauprozesses befindet.

Das Bauprojektcontrolling aus Sicht eines ausführenden Bauunternehmens kann in drei Phasen untergliedert werden. In der Phase vor Beginn der Bauausführung findet die Planung der Bauprozesse statt. Diese erste Phase des Bauprojektcontrollings entspricht der Angebotsbearbeitung sowie der oben beschriebenen Arbeitsvorbereitung. Während der folgenden Phase der Bauausführung steht die Kontrolle und Steuerung der Bauprozesse im Vordergrund. Nach Ende der Bauphase werden die abgeschlossenen Bauprozesse kontrolliert und analysiert.

Hier werden zunächst Montageprozesse auf Baustellen erörtert. Im Anschluss wird die baubetriebliche Termin- und Ressourcenplanung im Rahmen der Arbeitsvorbereitung dargestellt und danach die Kontrolle und Steuerung von Prozessen auf Baustellen betrachtet.

1.2.1 Montageprozesse im Bauwesen

In der stationären Industrie versteht man unter einer Montage einen Prozess, in dessen Verlauf ein Produkt mit definierten Funktionen aus Einzelteilen mit niedrigerer Komplexität zusammengebaut wird.¹⁴ Ähnlich kann man einen Baumontageprozess als Gesamtheit der Prozesse auf einer Baustelle, die der Entstehung einer Baukonstruktion aus vorgefertigten Elementen dienen, definieren. Die Montageprozesse im Bauwesen werden häufig in die Prozesse des Anschlagens, Hebens und Absetzens, der Ausrichtung sowie der Fixierung und Befestigung der Fertigteile untergliedert.^{15 16}

¹⁴ Vgl. Lotter/Wiendahl (Hrsg.) (2006): Montage in der industriellen Produktion, S. 1

¹⁵ Vgl. Bargstädt/Steinmetzger (2008): Grundlagen des Baubetriebswesens, S. 112

¹⁶ Vgl. Bauer (2007): Baubetrieb, S. 410 ff.

Aus systemtheoretischer Sicht kann man die Montage von Fertigteilen als System hinsichtlich seiner Funktion, seiner hierarchischen Einordnung und den Zusammenhängen zwischen seinen Systemelementen beschreiben.¹⁷ Die Funktion der Fertigteilmontage ist der Zusammenbau vorgefertigter Elemente. Sie gliedert sich im ersten Schritt in die Subsysteme der montagebezogenen Baustellenlogistik und der Montage im engeren Sinne, bestehend aus Justierung, Fixierung und Befestigung. Als Supersysteme kann zum einen das System „Fertigteile“ bestehend aus Planung, Herstellung, Transport zur Baustelle und Montage verstanden werden. Zum anderen ist die Montage auch Teil des Supersystems „Baustelle“ respektive „Bauprojekt“ mit den entsprechenden Fraktionen. Zuletzt besteht der Montageprozess aus verschiedenen Elementen, die zur Erfüllung der Systemfunktion miteinander interagieren. Als Akteure sind dies insbesondere die Arbeitskräfte sowie die von ihnen bedienten Geräte. Dazu kommen aber auch äußere Einflüsse sowie Fertigteile oder Befestigungsmittel, die zu montieren beziehungsweise zu verarbeiten sind.

Das Arbeitssystem nach REFA bietet eine Form an, mit der sich alle Aspekte eines Systems zur Aufgabenerfüllung strukturiert beschreiben lassen. Eine derartige generische Beschreibung des Montageprozesses für Fertigteilssysteme entsprechend dem REFA-Arbeitssystem ist in Tabelle 1 zusammengefasst.

¹⁷ Ropohl (2009): Allgemeine Technologie, S. 75 ff.

Arbeitssystem- Element	Ausprägung/Beschreibung
Aufgabe	Baustellentransport, Justierung und Befestigung der Fertigteile
Mensch	Monteur(e) und Baumaschinenführer mit adäquater Qualifikation und Einweisung
Betriebsmittel	Transportgeräte (z.B. Turmdrehkran, Mobilkran, Teleskopstap- ler) Richtstützen, Werkzeuge und Kleingeräte zur Befestigung
Ablauf	Anschlagen, Heben, Horizontaltransport, Senken, Halten, Justieren, Fixieren, Befestigen
Eingabe	Fertigteile am Lagerplatz/auf Transportfahrzeug
Ausgabe	montierte Fertigteile
Umwelt	Witterungseinflüsse, Baustelleneinflüsse, Baustellenorganisati- on, Montageort, Anlieferlogistik etc.

Tabelle 1: Beschreibung der Montage eines modularen Fassadensystems mit den Elementen des Arbeitssystems nach REFA

Trotz der Ähnlichkeit in der Definition einer Montage gibt es vier maßgebliche Unterschiede zwischen den Montageprozessen in der stationären Industrie und auf Baustellen:

1. Das Ergebnis der Baumontage ist stets ein Unikat, während in der Industrie häufig standardisierte Produkte montiert werden.
2. Die Baustelle befindet sich stets am Bestimmungsort des Objektes, d.h. der Montageort ist im Bauwesen veränderlich, wohingegen industrielle Montagearbeitsplätze meist ortsfest sind. Daraus ergibt sich für die Montagearbeiten im Bauwesen eine Vielzahl ergonomischer Belastungen der Arbeitskräfte wie zum Beispiel Witterungseinflüsse, ungünstige Arbeitspositionen und wechselnde Arbeitsorte.
3. Die Planungsprozesse für Gebäude sind meist in einmaligen Projektororganisationen verteilt und verlaufen häufig parallel zur Bauausführung. In der stationären Industrie werden indessen die meisten Planungsleistungen im Vorfeld durch interne Abteilungen oder Partner ausgeführt.
4. Die Dauer einer Montagebaustelle beträgt ein Vielfaches der Dauer üblicher Montagen in der Serienproduktion der stationären Industrie.

1.2.2 Arbeitsvorbereitung für die Montage

In der Arbeitsvorbereitung werden unter anderem Termin- und Ressourceneinsatzpläne aufgestellt, die die Basis für die termingerechte Abwicklung der Bauarbeiten und den Einsatz von Arbeitskräften und Baugeräte bilden. Als Grundlage hierfür sind die Bauverfahren und Baugeräte auszuwählen und die Leistung der Arbeitskräfte respektive Geräte für die einzelnen Tätigkeiten zu bestimmen. Montageprozesse stellen besonders hohe Anforderungen an die Baulogistik, da relativ viele Elemente je Zeiteinheit an den Einbauort gebracht werden müssen. Die Ablauf- und Fertigteilbedarfsplanung im Rahmen der Arbeitsvorbereitung ist daher unabdingbar, um einen störungsfreien Montageablauf zu gewährleisten.

Die übliche Vorgehensweise bei der Ablaufplanung ist in Abbildung 4 dargestellt und beginnt mit der Differenzierung der einzelnen Prozesse sowie der Definition der Prozessfolge. Zugleich werden die einzelnen Prozesse zusammengestellt und die zugehörigen Aufwandswerte und der Ressourceneinsatz spezifiziert, so dass die Dauer jedes Prozesses berechnet werden kann. Werden die Prozessdauern und die Prozessfolge in den Netzplan überführt, so lässt sich aus diesem der Termin- und Ressourcenplan ableiten. Da der erste Iterationsschritt zur Erstellung eines Termin- und Ressourcenplans meist weder wirtschaftlich noch zeitlich optimal ist und oft keinen kontinuierlichen Ressourceneinsatz ermöglicht, müssen Eingangsgrößen wie der Ressourceneinsatz oder auch das Bauverfahren variiert werden,

um die Dauer und Wirtschaftlichkeit der Bauausführung zu verbessern. Die Ablaufplanung stellt damit einen iterativen Planungsprozess dar, bei dem Varianten aufgestellt und miteinander verglichen werden.

Die Ablaufplanung für Montageprozesse basiert auf der Bauelementeliste und dem Verlegeplan. Ziel ist zum einen die Optimierung des Ressourceneinsatzes hinsichtlich des Verhältnisses von Monteuren zu Hebezeugen. Außerdem ist durch eine präzise Planung der Lieferlogistik die Just-In-Time-Anlieferung entsprechend der Reihenfolge und Geschwindigkeit der Montage anzustreben.

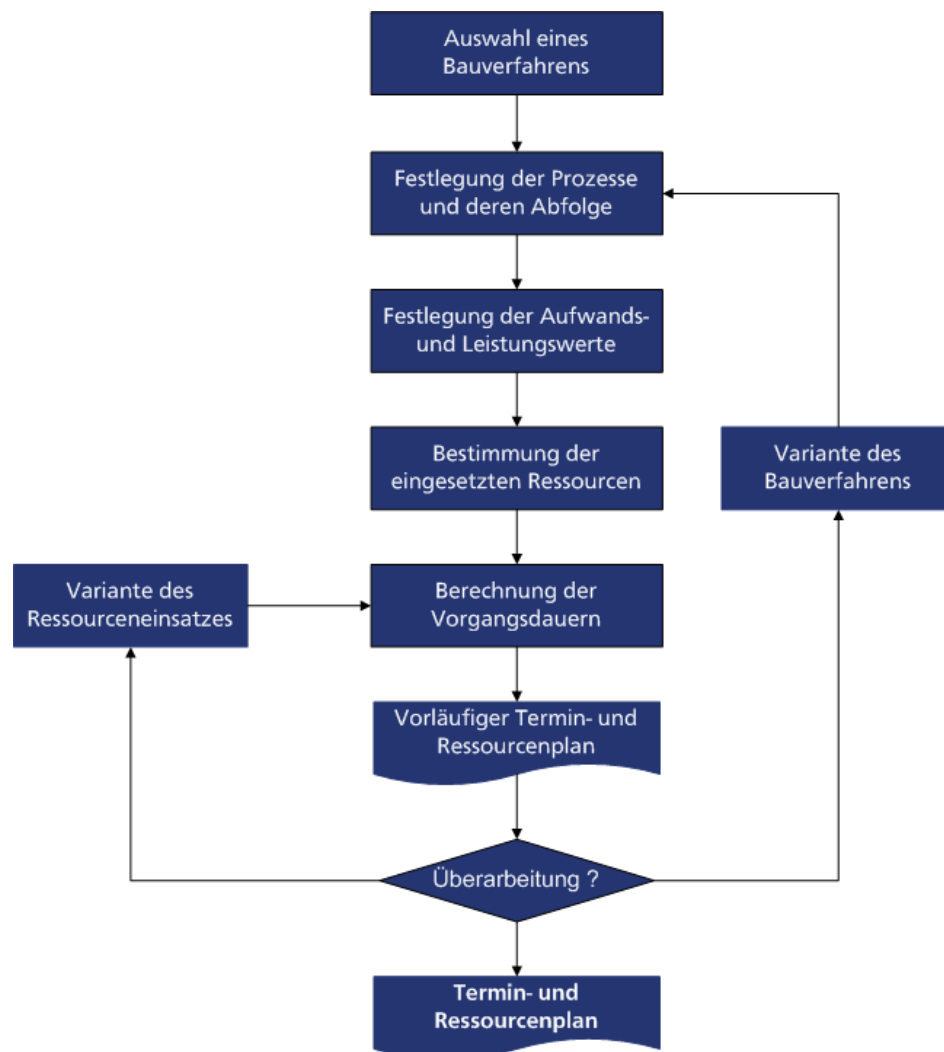


Abbildung 4: Ablauf der Termin- und Ressourcenplanung¹⁸

¹⁸ In Anlehnung an: Bauer (2007): Baubetrieb, S. 537

Die Bauablaufsimulation kann einen Beitrag zur Effizienzsteigerung in der Termin- und Ressourcenplanung leisten, denn ein Simulationsmodell zeichnet sich dadurch aus, dass es experimentierfähig ist und man seine Randbedingungen verändern kann. Damit ist es möglich, eine Vielzahl von Iterationen des Ressourceneinsatzes und der daraus resultierenden Terminplanung mit geringem Aufwand zu vergleichen.

1.2.3 Kontrolle und Steuerung von Montageprozessen im Bauwesen

Die Kontrolle und Steuerung der Bauprozesse ist ein zentrales Ziel des Bauprojektcontrollings. Wichtig ist vor allem die in Abbildung 5 dargestellte Verknüpfung der Planung mit der Kontrolle und Steuerung von Bauprozessen. Die Planung liefert Vorgaben, durch die Abweichungen erst erkannt werden können. Durch die Kontrolle werden die Abweichungen in der Ausführung erkennbar und zugleich die Unsicherheiten während der Planung durch Ist-Daten reduziert. Denn erst zum Zeitpunkt der Bauausführung lassen sich die Richtigkeit der Annahmen zu den Randbedingungen und die Verfügbarkeit der geplanten Ressourcen prüfen und die Wirksamkeit der Verfahren bzw. Geräte und das Verhalten der Arbeitskräfte ermitteln.¹⁹

¹⁹ Vgl. Horvarth (2009): Controlling, S. 146 ff.

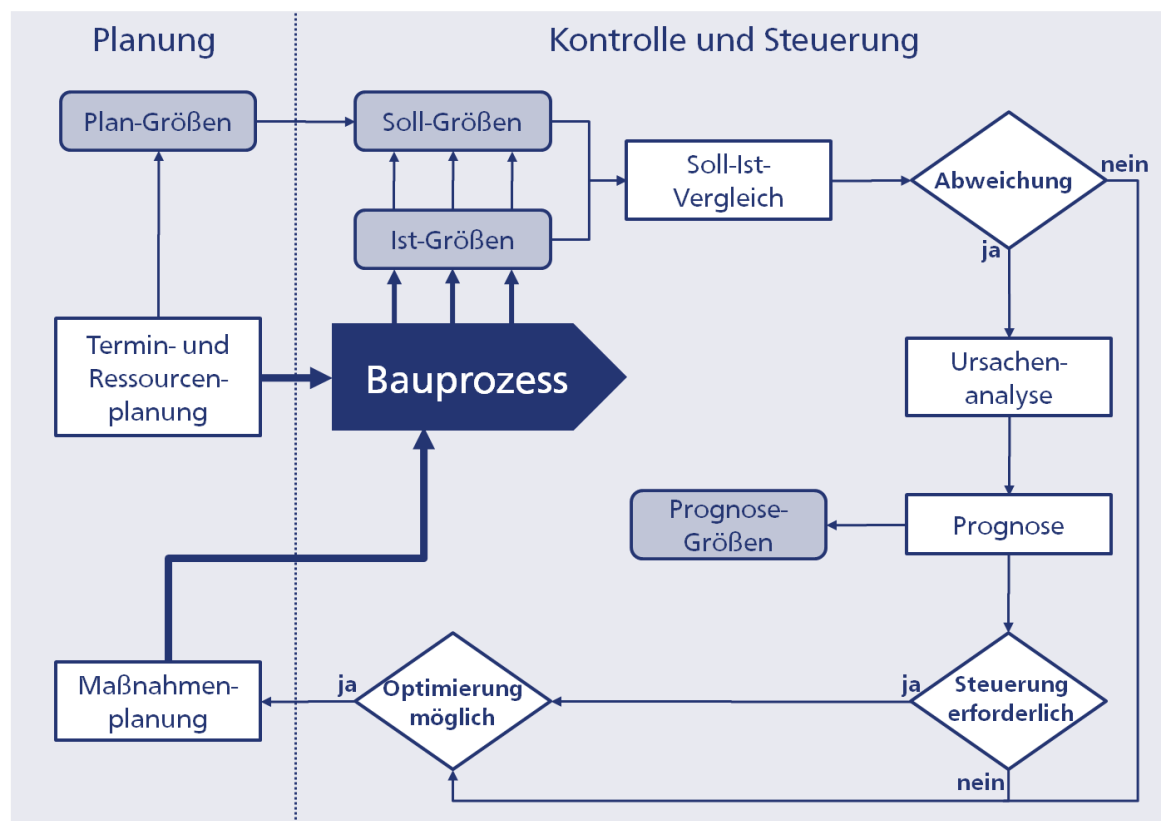


Abbildung 5: Ablauf der Kontrolle und Steuerung eines Bauprozesses²⁰

Um eine sinnvolle Kontrolle und Steuerung der Bauprozesse hinsichtlich der Terminsituation zu erreichen, sind Plan-, Soll-, Ist- und Prognose-Werte zum Baufortschritt zu vergleichen und zugleich die geplanten und tatsächlichen Randbedingungen und Ressourcen gegenüberzustellen. Als Plan-Größen werden dabei die Ergebnisse der Arbeitsvorbereitung verstanden. Ist-Größen spiegeln dagegen die tatsächlichen Bauprozesse wider und entstammen der Buchhaltung und dem Berichtswesen der Baustelle. Ihre Erfassung ist eine Grundvoraussetzung für die Kontrolle und Steuerung von Bauprozessen. Zur Ermittlung der Soll-Größen werden Planungs-Daten und Baustellen-Ist-Daten verknüpft. Die Prognose ergibt sich, indem man die aktuellen Erkenntnisse zum Verlauf der Bauprozesse in die Zukunft projiziert. Ergibt die Prognose des Baufortschritts die Notwendigkeit von Steuerungsmaßnahmen, so können entweder die Prozesse optimiert oder der Ressourceneinsatz angepasst werden. Aus wirtschaftlichen Gründen ist die Optimierung der Prozesse durch Vermeidung von Störungen und Verbesserung der Arbeitssysteme anzustreben. Die Aufstellung von Soll-Ist-Vergleichen und die Um-

²⁰ Weiterentwickelt nach Pflug (2008): Ein Bildinformationssystem zur [...] Bauprozesssteuerung, S. 20

setzung erforderlicher Steuerungsmaßnahmen im Rahmen des Baustellencontrollings obliegen dem Bauleiter des ausführenden Bauunternehmens. Er wird hierbei gegebenenfalls von einer Stabsstelle auf der Baustelle oder in der Niederlassung unterstützt.

Wegen der vielfältigen Abhängigkeiten zwischen den einzelnen Tätigkeiten zur Errichtung eines Bauwerks und den zahlreichen Störungsquellen für den Bauablauf erfordert die termingerechte Abwicklung eines Bauvorhabens eine aktive Bauprozesssteuerung. Die aktive Steuerung der Bauprozesse erfordert den zeitnahen Vergleich des Baufortschritts mit der Planung und schnelle Entscheidungen über notwendige Steuerungsmaßnahmen. Denn nur wenn in den frühen Phasen der Ausführung eines Bauprozesses Abweichungen erkannt und Gegenmaßnahmen eingeleitet werden, ist eine wirksame Beeinflussung des Bauablaufs möglich. Der zeitnahe Soll-Ist-Vergleich und eine unverzügliche Steuerung sind daher insbesondere bei schnellem Baufortschritt mit wechselnden Prozessen unabdingbar. Für den zeitnahen Soll-Ist-Vergleich müssen Daten zum Baufortschritt zeitnah erfasst und ausgewertet werden. Ziel ist die Erfassung des Baufortschritts in Echtzeit sowie die zeitnahe Bewertung des bisherigen und Prognose des zukünftigen Baufortschritts, um darauf aufbauend über Steuerungsmaßnahmen entscheiden zu können.

Der Ablaufplan sollte kein statisches Ergebnis der Arbeitsvorbereitung darstellen, sondern als dynamisches Steuerungsinstrument eingesetzt werden. Dies ist möglich, wenn die Planung der Termine und Ressourcen, die Ablaufkontrolle und die Steuerungsmaßnahmen verzahnt sind. Hierzu ist während der Ausführung der Bauprozesse der Ist-Ablauf festzustellen und mit Sollwerten auf Basis der Planungsdaten zu vergleichen, um mögliche Abweichungen analysieren, bewerten und deren Auswirkungen auf den Endtermin prognostizieren zu können. Die Bauablaufsimulation kann hierzu einen Beitrag leisten, indem sie ein lauffähiges Simulationsmodell für Experimente zum Bauablauf bei unterschiedlichen Randbedingungen zur Verfügung stellt. Diese Experimente können auf effiziente Weise Daten zum Baufortschritt bereitstellen. Hierbei kann es sich um Planungsdaten, Sollwerte oder aktuelle Prognosen zum Baufortschritt oder der Auswirkung von Steuerungsmaßnahmen handeln.

Neben der Terminsituation beeinflusst die termin- und ressourcenbezogene Bauprozesssteuerung die Kosten einer Baustelle und ermöglicht erst eine zielgerichtet Steuerung der Kostenentwicklung, da diese stark vom Ressourceneinsatz und der Einhaltung von Terminen abhängt.

Kapitel 2

Informationstechnische Grundlagen für die agentenbasierte Simulation und den Informationsaustausch im Baubetrieb

2.1 Agentenbasierte Simulation für den Baubetrieb

Die Fortschritte in der Informatik und die Leistungsfähigkeit heutiger Computersysteme machen die rechnergestützte Simulation zu einem mächtigen Werkzeug für die Analyse und Optimierung von Prozessen. Unter den existierenden Simulationstechniken erscheint die Multiagentensimulation für die Nachbildung des Bauablaufs als besonders geeignet. Durch ihr individuenbasiertes Modell kann die Multiagentensimulation das Verhalten und die Eigenschaften einzelner Arbeitskräfte und Geräte abbilden, so dass eine dynamische Nachbildung des Bauablaufs und die Einbeziehung arbeitswissenschaftlicher Erkenntnisse möglich werden.

Der Fokus der Simulationsanwendung liegt im Rahmen dieser Arbeit auf der in Kapitel 1 beschriebenen Arbeitsvorbereitung und Steuerung von Montageprozessen. Diese sollen eine Bauablaufsimulation für die Planung, Kontrolle und Steuerung von Terminen und Ressourcen nutzen. Die hier beschriebenen Grundlagen werden daher in den Kapiteln 4 und 5 genutzt, um ein Vorgehensmodell für die Modellbildung und Simulationsanwendung im Baubetrieb zu entwickeln.

2.1.1 Simulation

Im Allgemeinen lassen sich zwei Definitionen des Begriffs der Simulation unterscheiden. Die Simulation im weiteren Sinne beschreibt alle Aktivitäten zur Nachbildung und Prognose der Realität durch Experimente mit einem oder mehreren Szenarien eines lauffähigen Modells. In Abgrenzung davon bezeichnet die Simula-

tion im engeren Sinn ausschließlich die Berechnung des Modellverhaltens für ein Szenario während des Experiments.²¹

Der VDI definiert Simulation als „das Nachbilden eines Systems mit seinen dynamischen Prozessen in einem experimentierfähigen Modell, um zu Erkenntnissen zu gelangen, die auf die Wirklichkeit übertragbar sind“²² und folgt damit dem weiter gefassten Simulationsbegriff. Ein Modell ist dabei als vereinfachtes Abbild eines realen Systems zu verstehen, wobei sich sowohl das reale System als auch dessen Modell aus voneinander abgrenzbaren Elementen zusammensetzen, die wiederum zueinander in Beziehung stehen.²³

Wichtig ist hier der Bezug des Simulationsmodells zu einem realen System, der in Abbildung 6 verdeutlicht wird. Die Simulation im engeren Sinne respektive das Experiment sollen demnach das Verhalten eines realen Systems prognostizieren. Damit ist es durch Variation der Modellparameter in unterschiedlichen Szenarien möglich, die Auswirkungen solcher Veränderungen vorherzusagen.

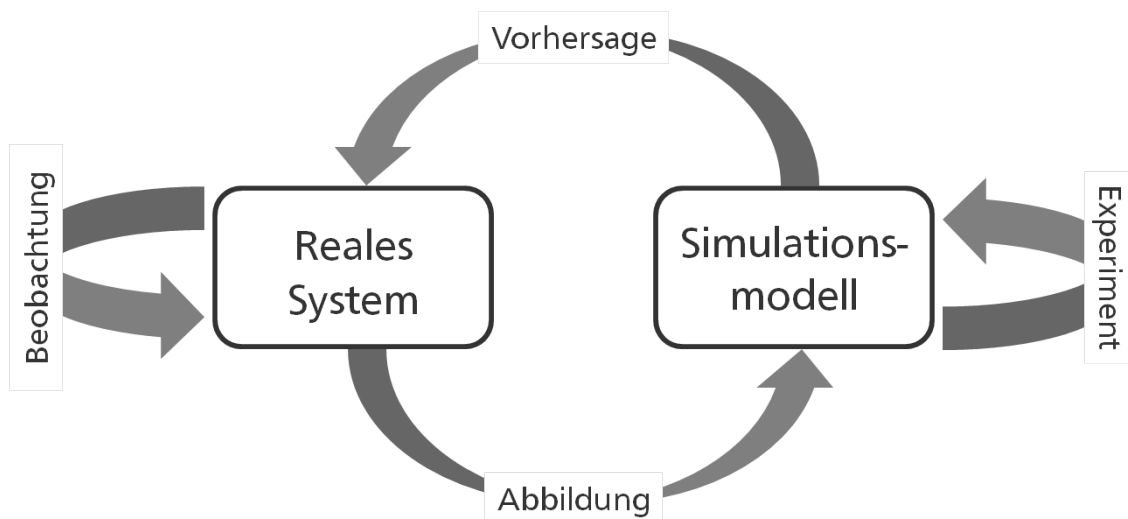


Abbildung 6: Zusammenhang zwischen Realität und Modell in der Simulation²⁴

Im Rahmen dieser Arbeit wird der Begriff der Simulation selten ohne eine weitere Präzisierung verwendet und ansonsten im weiteren Sinne, d.h. zur Beschreibung von Modellierung und Experimentation benutzt.

²¹ Vgl. Bungartz et al (2009): Modellierung und Simulation, S. 1

²² VDI 3633 (12/1993): Simulation von Logistik-, Materialfluß- und Produktionssystemen, S. 3

²³ Vgl. ebenda, S.3

²⁴ In Anlehnung an Klügl (2001): Multiagentensimulation, S. 46

2.1.1.1 Klassifikation von Simulationen

Da Simulationen in den unterschiedlichsten Anwendungsgebieten zum Einsatz kommen, gibt es eine große Vielfalt an Simulationstechniken. Hier wird daher ein kurzer Überblick über deren Charakteristika gegeben. Dies sind vor allem die Diskretheit und Determiniertheit, die Abbildung von Raum und Zeit sowie deren Skalierung.

In einem diskreten Modell wird das Systemverhalten über diskrete respektive kombinatorische Beschreibungen abgebildet. Es werden oft Graphen, Zustandsübergänge oder regelbasierte Systeme eingesetzt. Ein kontinuierliches Modell verfügt dagegen über kontinuierliche Zustandsgrößen, deren Abhängigkeiten mittels algebraischer Gleichungen oder Differentialgleichungen ausgedrückt werden können. Ein deterministisches Modell liefert reproduzierbare Simulationsergebnisse, da es keinerlei Zufallskomponenten enthält, und steht damit im Gegensatz zu stochastischen Modellen.²⁵

Grundsätzlich lassen sich Modelle, die den Raum abbilden, von solchen unterscheiden, die kein Raummodell besitzen. Die Modellierung des Raums ist zudem zwei- oder dreidimensional sowie diskret oder kontinuierlich möglich. Der Verlauf der Zeit in einem Simulationsmodell folgt in der Regel der Modellzeit, die von der tatsächlichen Echtzeit zu unterscheiden ist. Die Abbildung der Zeit in einem Modell kann rundenbasiert oder ereignisbasiert erfolgen. Bei einem rundenbasierten Simulationsmodell wird das Modell in jedem Zeittakt, also jeder Runde, vollständig berechnet. In einem ereignisbasierten Modell erfolgt die Berechnung dagegen von einem Ereignis zum nächsten.²⁶

Ein Simulationsmodell lässt sich anhand verschiedener Skalen beschreiben. Von Bedeutung sind vor allem die Auflösung von Raum und Zeit sowie die Anzahl an Elementen im Simulationsmodell, wobei sich die Bedeutung der einzelnen Aspekte und damit die zu wählende Skala aus dem jeweiligen Anwendungsfall für die Simulation ergeben.²⁷ Generell kann man Makrosimulationen und mikroanalytische Simulationen unterscheiden. In einer Makrosimulation wird das Gesamtsystem durch Zustandsgrößen und deren Beziehungen untereinander beschrieben,

²⁵ Vgl. Bungartz et al (2009): Modellierung und Simulation, S. 11 f.

²⁶ Vgl. Oechslein (2004): Vorgehensmodell [...] für Multiagentensimulationen, S. 46 f.

²⁷ Vgl. Bungartz et al (2009): Modellierung und Simulation, S. 12 ff.

während in einer mikroanalytischen Simulation einzelne Individuen sowie deren Eigenschaften betrachtet werden.²⁸

2.1.1.2 Vorgehen bei der Simulation

Für den Ablauf bei der Aufstellung und Nutzung eines Simulationsmodells gibt es eine Vielzahl an Vorgehensweisen, die die auszuführenden Schritte unter verschiedenen Aspekten beschreiben. Im Kern handelt es sich dabei um die Aufstellung eines abstrakten Konzepts, das dann lauffähig zu implementieren und auf seine Tauglichkeit und Richtigkeit hin zu prüfen ist, um schließlich Experimente durchführen und auswerten zu können.

Die in Abbildung 7 dargestellte Vorgehensweise nach VDI-Richtlinie 3633 beinhaltet eine ganzheitliche Beschreibung der Simulation zur Lösung eines konkreten Problems. Ausgehend von der Problemstellung und der Entscheidung über deren Simulationswürdigkeit werden zunächst die Ziele und der Aufwand für das Simulationsprojekt formuliert. Daran schließen sich die Schritte der Datenbereitstellung, der Modellierung, des Simulationslaufs und der Ergebnisanalyse an. Worauf die ggf. iterativen Schritte der Überprüfung und Bewertung sowie Umsetzung der Simulationsergebnisse folgen.²⁹

Das Vorgehensmodell zur Simulation nach Rabe, Spiekermann und Wenzel legt den Fokus auf die Einbindung der Verifikation und Validierung während aller Schritte der Simulation. Hierzu werden aufbauend auf die VDI-Vorgehensweise die Schritte zur Modellierung und Experimentation sowie die Schritte zur Datenbereitstellung getrennt und für jeden einzelnen Schritt Ergebnisse definiert, um sie verifizieren und validieren zu können.³⁰

²⁸ Vgl. Oechslein (2004): Vorgehensmodell [...] für Multiagentensimulationen, S. 45 f.

²⁹ Vgl. VDI 3633 (12/1993): Simulation von Logistik-, Materialfluß- und Produktionssystemen, S. 9 ff.

³⁰ Vgl. Rabe et al (2008): Verifikation und Validierung für die Simulation [...], S. 4 ff.

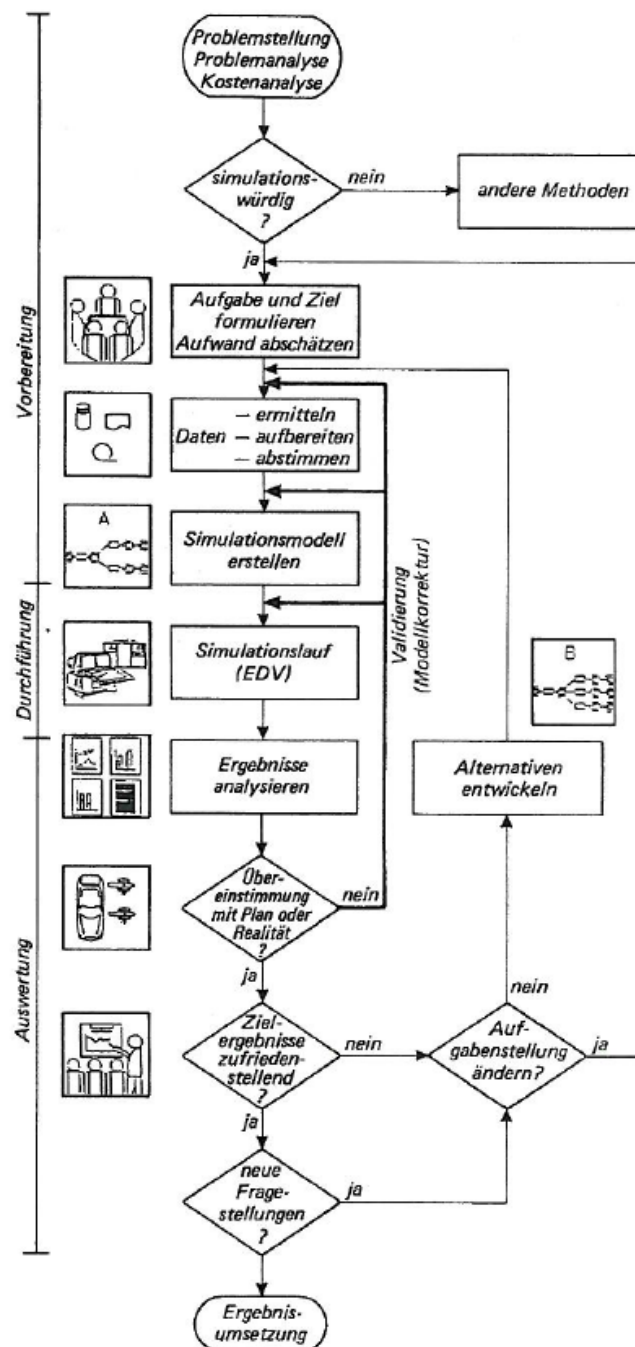


Abbildung 7: Vorgehensweise bei der Simulation nach VDI-Richtlinie 3633³¹

Bungartz et al prägen schließlich den Begriff der Simulationspipeline, in der sie die sechs Schritte der Modellierung, Berechnung, Implementierung, Visualisie-

³¹ Aus: VDI 3633 (12/1993): Simulation von Logistik-, Materialfluß- und Produktionssystemen, S. 9

rung, Validierung und Einbettung differenzieren und über Feedbackschleifen verbinden. Als besonders bedeutsam werden dabei die ersten beiden Schritte hervorgehoben und nochmals verfeinert. Die Modellierung beginnt mit einer nichtformalen Beschreibung des zu modellierenden Systems, die dann in die semiformale Beschreibungssystematik des Anwendungsgebiets überführt wird, um schließlich die streng formale Beschreibungsform eines mathematischen Modells zu erzeugen. Darauf folgt die Anwendung rechnergestützter Algorithmen zur Ausführung des lauffähigen Simulationsmodells.³²

2.1.1.3 Qualitätsmanagement in der Simulation

Qualität wird nach EN ISO 9000 als „Grad, in dem ein Satz inhärenter Merkmale Anforderungen erfüllt“³³, definiert. Qualität entsteht also durch die Erreichung von Qualitätsmerkmalen, die inhärente Eigenschaften eines Produkts, Prozesses oder Systems sind und sich auf die gestellten Anforderungen respektive Erfordernisse oder Erwartungen beziehen. Hierzu kann ein Qualitätsmanagementsystem dienen, das eine Organisation bezüglich der Qualität leitet und lenkt.³⁴ Als Grundlage für das Management der Qualität einer Simulation sind Kriterien für Simulationsqualität aufzustellen und der allgemeine Begriff der Qualität in Bezug auf die Simulation zu präzisieren.

Nach Robinson lassen sich innerhalb der Simulationsqualität drei Konzepte unterscheiden. Die Inhaltsqualität beschreibt dabei die Qualität des Simulationsmodells sowie die Qualität der Durchführung und Auswertung der Experimente. Die Prozessqualität bezieht sich dagegen auf die Art und Weise, wie die Simulation ausgeführt wird. Und die Ergebnisqualität steht für die Nützlichkeit der Simulationsstudie in ihrem Kontext und hinsichtlich ihres Ziels.³⁵ Neben diesen drei Konzepten werden oft die drei Aspekte der Gültigkeit, Glaubwürdigkeit und Annehmbarkeit zur Beschreibung der Qualität einer Simulation verwendet.³⁶ Die Gültigkeit kann als Validität, wie sie weiter unten beschrieben wird, verstanden werden. Die Glaubwürdigkeit beschreibt das Vertrauen der Nutzer oder Entscheider in die Simulationsergebnisse, und die Annehmbarkeit setzt die Glaubwürdigkeit mit den Kosten und dem Zeitaufwand der Simulation ins Verhältnis. Die drei Konzepte zur

³² Vgl. Bungartz et al (2010): Modellierung und Simulation, S. 2 ff.

³³ EN ISO 9000:2005 (D/E/F): Qualitätsmanagementsysteme – Grundlagen und Begriffe, S. 18

³⁴ Vgl. ebenda, S. 19, 20 und 26

³⁵ Vgl. Robinson (2002): General concepts of quality for discrete-event simulation, S. 106 ff.

³⁶ Vgl. ebenda, S. 104

Simulationsqualität nach Robinson stehen, wie in Abbildung 8 dargestellt, untereinander und mit den drei Aspekten zur Qualitätsbeschreibung in Beziehung.

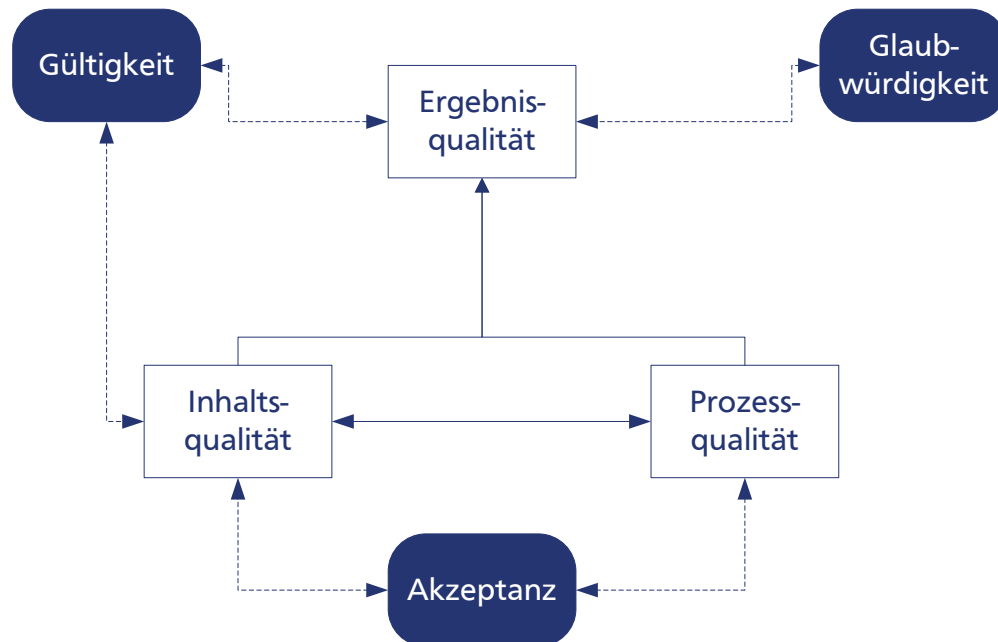


Abbildung 8: Qualitätsbegriffe in der Simulation³⁷

Basierend hierauf gelten nach Wenzel et al fünf Qualitätskriterien für Simulationsprojekte in Produktion und Logistik. Dies sind eine hinreichende Sorgfalt bei der Vorbereitung, eine konsequente Dokumentation, die permanente Verifikation und Validierung, die Beteiligung des Auftraggebers sowie die systematische Durchführung des Simulationsprojektes.³⁸

Nachdem im vorangegangenen Abschnitt bereits Vorgehensmodelle zur systematischen Simulationsdurchführung beschrieben wurden, wird hier besonders auf die Verifikation und Validierung von Simulationsmodellen eingegangen. Bei der Verifikation wird die Korrektheit der Transformation eines Modells von einer Beschreibungsart in eine andere überprüft.³⁹ Die Validierung prüft dagegen, ob die Abbildung eines Systems in einem Modell das ursprüngliche Systemverhalten hinreichend genau wiedergibt.⁴⁰ Zur Verifikation und Validierung eines Simulations-

³⁷ Weiterentwickelt nach: Robinson (2002): General concepts of quality for discrete-event simulation

³⁸ Vgl. Wenzel et al (2008): Qualitätskriterien der Simulation, S. 12

³⁹ Vgl. Rabe et al (2008): Verifikation und Validierung für die Simulation [...], S. 14

⁴⁰ Vgl. Rabe et al (2008): Verifikation und Validierung für die Simulation [...], S. 15

modells werden Tests verwendet, die sich häufig nicht eindeutig der Verifikation oder Validierung zuordnen lassen⁴¹, weshalb im Rahmen dieser Arbeit meist von Verifikation und Validierung (V&V) als zusammenhängendes Begriffspaar gesprochen wird.

Die Gesamtheit der Tests zur Verifikation und Validierung bei der Simulation kann im Rahmen dieser Arbeit nicht behandelt werden. Es wird daher auf die entsprechende Fachliteratur von Rabe et al⁴² oder Sargent⁴³ verwiesen. Hier sollen nur diejenigen Tests dargestellt werden, die im Rahmen des baubetrieblichen Vorgehensmodells für die individuenbasierte Bauablaufsimulation zur Anwendung vorgeschlagen werden. Sie sind in Tabelle 2 kurz beschrieben.

Bezeichnung des Tests	Kurzbeschreibung
Animation	Graphische Darstellung der zeitlichen Abläufe während eines Simulationsexperiments
Monitoring (Operational Graphics)	Graphische Darstellung des Verlaufs von Zustandsgrößen während der Experimentation
Begutachtung (Review/Face Validity)	Beurteilung der Simulationsergebnisse durch Experten für das simulierte Realsystem
Teilmodelltests (Module Testing)	Anwendung von Tests auf Ausschnitte des gesamten Simulationsmodells
Sensitivitätsanalyse	Veränderung von Eingabewerten und Überprüfung der Ausgabeparameter
Grenzwerttest (Extreme Conditions Test)	Überprüfung der Plausibilität der Simulationsergebnisse bei extremen Eingabewerten

Tabelle 2: V&V-Tests für die baubetriebliche Simulation⁴⁴

Die im Rahmen der Tests für die Verifikation und Validierung des Simulationsmodells festgestellten Abweichungen zwischen Simulationsmodell und realem System können teilweise durch Justieren bestimmter Modellparameter minimiert werden. Unter Justierung wird im Rahmen dieser Arbeit folglich das Einstellen von Parametern verstanden, um eine weitgehende Übereinstimmung der Ergebnisse der Simulationsexperimente mit realen Messwerten zu erreichen.

⁴¹ Vgl. ebenda, S.16

⁴² Rabe et al (2008): Verifikation und Validierung für die Simulation [...]

⁴³ Sargent (1998): Verification and Validation of Simulation Models

⁴⁴ Vgl. Rabe et al (2008): Verifikation und Validierung für die Simulation [...], S. 95 ff.

2.1.2 Agenten in der Informatik

Das Konzept des Agenten wird seit über 20 Jahren in der Informatik verwendet und kann als natürliche Weiterentwicklung der objektorientierten Programmierung verstanden werden.⁴⁵ Franklin und Graesser definieren einen autonomen Agenten als ein System, das eigenständig in einer Umwelt existiert und auf diese kontinuierlich und seinen eigenen Zielen folgend reagiert, wobei der Agent damit seine eigene Wahrnehmung in der Zukunft mitbestimmt.⁴⁶

In diesem Kapitel wird ein Überblick der Eigenschaften, des Verhaltens und der Umwelt von Software-Agenten gegeben und eine Klassifikation derselben vorgestellt. Darüber hinaus werden Multiagentensysteme im Allgemeinen sowie die Organisation, Kooperation und Kommunikation mehrerer Agenten untereinander beschrieben.

2.1.2.1 Das Konzept des autonomen Software-Agenten

Es existiert eine Vielzahl konkurrierender Definitionen für autonome Software-Agenten, deren Diskussion im Rahmen dieser Arbeit nicht zielführend ist. Stattdessen werden in Abbildung 9 die neun zentralen Eigenschaften von Agenten in der Informatik zusammengefasst, die zur Charakterisierung von Agenten dienen können und hier kurz erläutert werden.

Jeder Agent existiert in Bezug auf seine Umwelt, die er durch seine Wahrnehmung erkennen kann. Zur Erreichung seiner Ziele handelt der Agent proaktiv und flexibel, wobei er auf Basis seiner Informationen über die Umwelt rationale Entscheidungen trifft. Darüber hinaus hat ein Agent meist die Fähigkeit, mit anderen Agenten zu interagieren, wozu er Fähigkeiten zur Kommunikation besitzt. Außerdem haben viele Agenten humanoide respektive menschenähnliche Eigenschaften.

⁴⁷ ⁴⁸ ⁴⁹ ⁵⁰

⁴⁵ Vgl. Wooldridge, Jennings (1995): Intelligent Agents – Theory and Practice, S. 5

⁴⁶ Vgl. Franklin, Graesser (1996): Is it an agent or just a program, S. 25

⁴⁷ Vgl. Ferber (2001): Multiagentensysteme, S. 29

⁴⁸ Vgl. Wooldridge, Jennings (1995): Intelligent Agents – Theory and Practice, S. 4 ff.

⁴⁹ Vgl. Franklin, Graesser (1996): Is it an agent or just a program, S. 29

⁵⁰ Vgl. Klügl (2001): Multiagentensimulation, S. 14 f.



Abbildung 9: Eigenschaften autonomer Software-Agenten⁵¹

Die Umwelt, in der sich ein Agent befindet, die er wahrnimmt und die er durch seine Handlungen beeinflussen kann, lässt sich anhand von fünf Kategorien charakterisieren. Zunächst kann zwischen vollständig und teilweise wahrnehmbaren Umgebungen sowie deterministischen und stochastischen Umgebungen unterschieden werden. Sowohl die Wahrnehmbarkeit als auch die Determiniertheit der Umwelt beeinflussen die Unsicherheit über die Auswirkungen von Handlungen des Agenten. Außerdem ist das Verhalten der Umwelt über die Zeit von großer Bedeutung. Die Umgebung kann sich dem Agenten entweder in Episoden darstellen, die einander nicht beeinflussen, oder die Umgebung ist sequentiell, d.h. vergangene Entscheidungen und Handlungen wirken sich auf die Gegenwart aus. Daneben gibt es statische und dynamische Umgebungen, die sich darin unterscheiden, ob sich die Umwelt verändert, während der Agent eine Entscheidung trifft oder nicht. Zuletzt können der Zustand und die Zeit der Umwelt sowie die Wahrnehmung der Umwelt und die in der Umwelt stattfindenden Handlungen des Agenten als diskret oder stetig beschreiben werden.⁵²

Die Modellierung des Verhaltens eines Agenten kann je nach Zielsetzung und Einsatzgebiet variieren. Allgemein besitzt jeder Agent eine Wahrnehmung der Um-

⁵¹ eigene Darstellung

⁵² Vgl. Russel, Norvig (2004): Künstliche Intelligenz – Ein moderner Ansatz, S. 66 ff.

welt und führt bestimmte Aktionen aus, die die Umwelt beeinflussen.⁵³ Hier soll ein Verhaltensmodell vorgestellt werden, bei dem sich die Handlungen des Agenten aus seinem Wissen über seine Umwelt ergeben. Das Verhaltensmodell soll als deklaratives Modell die allgemeine Formulierung des Agentenverhaltens von dessen konkreter Implementierung trennen, weshalb die Verhaltensbeschreibung über ein regelbasiertes Schema erfolgt. Dabei werden Aktionen respektive Handlungen des Agenten immer dann ausgelöst, wenn die zugehörigen Konditionen dem Zustand der Welt entsprechen.⁵⁴

Zur Strukturierung einer Regelmenge zur Beschreibung der Gesamtheit der Aktionen eines Agenten ist deren Gruppierung nach Vorbedingungen möglich. Allerdings ist dann sowohl die Eingabe eines sequentiellen Verhaltens als auch die Überprüfung aller Regeln zu jedem Zeitpunkt ineffizient.⁵⁵ Um dies zu verbessern, können Aktionen, die gemeinsam auszuführen sind und identische Vorbedingungen haben, zu Aktivitäten zusammengefasst werden. Zur weiteren Strukturierung und Effizienzsteigerung ist jede Aktivität persistent, d.h. die in ihr enthaltenen Aktionen werden solange ausgeführt, bis eine Endbedingung erfüllt ist. Jede Endbedingung ist zugleich die Startbedingung für eine nachfolgende Aktivität, so dass Handlungsabläufe effizient dargestellt werden können.⁵⁶

Russel und Norvig klassifizieren Agenten über die Aspekte, die bei der Entscheidungsfindung berücksichtigt werden. Es werden vier Grundtypen unterschieden: Der einfache Reflex-Agent handelt regelbasiert und verarbeitet dabei lediglich seine aktuelle Wahrnehmung. Der modellbasierte Reflex-Agent besitzt dagegen einen internen Zustand und ein Modell der Welt, so dass für die regelbasierte Entscheidung über seine Handlungen im Vergleich zum einfachen Reflex-Agenten zusätzliche Informationen zur Verfügung stehen. Der zielbasierte Agent weist darüber hinaus eine Zielfunktion zur Aktionsauswahl auf, woraus sich die Notwendigkeit zur Lösungssuche und Planung ergibt. Der nutzenbasierte Agent ist zusätzlich in der Lage, den Nutzen einer Funktion zu bestimmen und kann daher nach einer Lösung mit höchstmöglichem Nutzen suchen.⁵⁷ Für die beiden Reflex-Agenten lässt sich das oben beschriebene regelbasierte Verhaltensmodell anwenden, das im Hinblick auf die Bauablaufsimulation als ausreichend erscheint.

⁵³ Vgl. Russel, Norvig (2004): Künstliche Intelligenz – Ein moderner Ansatz, S. 55 ff.

⁵⁴ Vgl. Klügl (2001): Multiagentensimulation, S. 59 ff.

⁵⁵ Vgl. ebenda, S. 65 f.

⁵⁶ Vgl. ebenda, S. 122 ff.

⁵⁷ Vgl. Russel, Norvig (2004): Künstliche Intelligenz – Ein moderner Ansatz, S. 72 ff.

2.1.2.2 Multiagentensysteme

Die oben beschriebenen Agenten existieren in der Informatik nicht als singuläre Entitäten, sondern sind üblicherweise Teil eines Systems von Agenten. Wooldridge geht sogar so weit zu sagen, dass es so etwas wie ein „Ein-Agenten-System“ nicht gibt.⁵⁸ Die Verteilung von Aktivitäten und Entscheidungen auf Agenten lässt sich mit dem Netzwerkcharakter vieler realer Systeme sowie der Aufteilung von Problemen und Funktionen zu deren Bewältigung begründen. Außerdem können komplexe Probleme durch die Betrachtung aus unterschiedlichen lokalen Perspektiven besser strukturiert und gelöst werden. Zudem ermöglichen verteilte Systeme die notwendige Flexibilität, um sich an variable Aufgabenstellungen und eine dynamische Umwelt anzupassen.⁵⁹

Ein Multiagentensystem besteht aus einer Umwelt, die Raum und Zeit repräsentiert und Mechanismen besitzt, um das Verhalten des Gesamtsystems abzubilden. In dieser Umwelt sind Objekte situiert, dass heißt sie befinden sich im Raum-Zeit-Gefüge der Umwelt. Dabei ist die Menge der Objekte in passive Objekte und aktive Agenten zu unterteilen. Weitere Merkmale eines Multiagentensystems sind die Beziehungen der Objekte untereinander sowie die Handlungsmöglichkeiten der Agenten in Bezug auf andere Objekte.⁶⁰

Die wichtigsten Eigenschaften eines Multiagentensystems sind die Beschränkungen jedes einzelnen Agenten hinsichtlich seiner Informationen und Fähigkeiten, die dezentrale Datenhaltung und das autonome Handeln der einzelnen Agenten sowie das Fehlen einer zentralen Steuerung des Systems.⁶¹

Eine zentrale Rolle spielt außerdem die Interaktion, also die dynamische Beziehung von mindestens zwei Agenten durch wechselseitige Aktionen. Hierzu muss eine Menge an aktions- und kommunikationsfähigen Agenten existieren, die sich in bestimmten Situationen begegnen und dann zeitlich und/oder räumlich begrenzte Beziehungen eingehen. Die Interaktionen werden dabei von den Zielen und Absichten sowie den Ressourcen und Fähigkeiten der Agenten charakterisiert. So können kompatible Ziele und begrenzte Ressourcen und Fähigkeiten der ein-

⁵⁸ Vgl. Wooldridge (2002): Multiagentsystems, S. 105

⁵⁹ Vgl. Ferber (2001): Multiagentensysteme, S. 26 ff.

⁶⁰ Vgl. ebenda, S. 31

⁶¹ Vgl. Jennings, Wooldridge (1998): Applications of Intelligent Agents

zelnen Agenten deren Kooperation erforderlich machen, während begrenzte Ressourcen und inkompatible Ziele zu Konflikten führen.⁶²

Als Ergebnis der Interaktion und Dynamik von Multiagentensystemen kann die Emergenz dieser Systeme angesehen werden. Emergenz steht für die spontane Entstehung von Strukturen und Eigenschaften auf der Makroebene eines Systems aufgrund der Interaktion der Systemelemente.⁶³

Eine Organisation lässt sich als ein „zielgerichtetes, offenes, soziales System mit einer formalen Struktur“⁶⁴ definieren, wobei die formale Struktur in expliziten Regeln ausgedrückt wird, die eine Organisationsstruktur schaffen.⁶⁵ Die Multiagentenorganisation dient dazu, die einzelnen Agenten miteinander zu vernetzen, damit sie ein gemeinsames Ziel erreichen können.⁶⁶

Die Organisation eines Multiagentensystems lässt sich über rollenbezogene Agentenklassen und die Beziehungen der Agentenklassen untereinander beschreiben. Außerdem ist es möglich, verschiedene Ebenen einer Organisation zu betrachten, so dass die Wechselwirkungen zwischen Sub- und Metaebenen modelliert und beobachtet werden können. Die Aufgabe des Modellierers eines Multiagentensystems besteht darin, eine adäquate Organisation für die Agenten zu erschaffen. Eine Organisation ist dann adäquat, wenn sie für eine effiziente Zielerreichung sorgt oder die realen Strukturen zweckmäßig abbildet. Für die weitergehende Analyse der Funktion und Struktur von Multiagentenorganisationen sowie Hilfsmitteln zur Implementierung von Organisationsstrukturen wird auf die Fachliteratur verwiesen.⁶⁷

Die Kooperation von Agenten soll hier aus Sicht eines Beobachters, der beispielsweise das Verhalten einer agentenbasierten Simulation beobachtet, beschrieben werden. Man kann definieren, dass mehrere Agenten kooperieren, wenn das Hinzufügen eines Agenten die Gesamtleistung steigert, oder die Agenten derart agieren, dass Konflikte vermieden respektive gelöst werden.⁶⁸ Im Bauwesen kann hier die Zusammenarbeit in einer Kolonne oder die Koordination der Krannutzung durch unterschiedliche Kolonnen als Beispiel dienen.

⁶² Vgl. Ferber (2001): Multiagentensysteme, S. 83 ff.

⁶³ Vgl. Holland (1998): Emergence – From Chaos to order, S. 121 f.

⁶⁴ Schulte-Zurhausen (2005): Organisation, S. 1

⁶⁵ Vgl. ebenda, S. 2 f.

⁶⁶ Vgl. Ferber (2001): Multiagentensysteme, S. 113

⁶⁷ Vgl. ebenda, S. 114 ff.

⁶⁸ Vgl. ebenda, S. 96 ff.

Die Steigerung der Leistung einer Gruppe durch Kooperation mit weiteren Agenten kann sowohl hinsichtlich der Fähigkeiten des zusätzlichen Agenten als auch bezüglich der Leistungssteigerung qualitativer und quantitativer Natur sein, so dass sich vier Arten der Leistungssteigerung durch Kooperation unterscheiden lassen. Eine qualitative Leistungssteigerung, bei der bestimmte Aktionen durch die Kooperation überhaupt erst möglich werden, kann dabei durch neue Fähigkeiten oder Ressourcen des Kooperationspartners oder den Masseffekt entstehen, der zu beobachten ist, wenn eine Handlung eine bestimmte Anzahl an Agenten voraussetzt. Die quantitative Leistungssteigerung, also eine Erhöhung des Outputs je Zeiteinheit, ist durch zusätzliche Agenten, die identische Aufgaben parallel erledigen, oder so genannte Katalysatorphänomene möglich. Ein Agent mit neuen Fähigkeiten wirkt dann wie ein Katalysator, wenn die Aufgabenerfüllung einer Agentengruppe durch seine Aktivitäten begünstigt wird.⁶⁹ Baubetriebliche Beispiele hierfür sind die Kooperation von Hebezeug und Monteur zur Fertigteilmontage oder die parallele Montage von zwei Fertigteilen durch zwei Montagekolonnen mit zwei Hebezeugen.

Von den sechs Kooperationsmethoden, die Ferber vorstellt, kommen in dieser Arbeit drei zur Anwendung und sollen kurz erläutert werden. Die Kommunikation stellt die Basis für die Aufgabenverteilung und das koordinierte Handeln von Agenten dar und findet bei der Kooperation menschlicher Arbeitskräfte verbal und nonverbal statt. Der gemeinsame Zugriff der Agenten auf Ressourcen und Aufträge ist eine weitere Form der Kooperation, die für die Modellierung von Montageprozessen erforderlich ist. Die Koordinierung der Aktionen ist bei der Kooperation mehrerer Agenten nötig, um die Voraussetzungen für eine produktive Zusammenarbeit zu schaffen.⁷⁰

2.1.2.3 Kommunikation unter Agenten

Die Fähigkeit zur Kommunikation ist für Agenten in einem Multiagentensystem von zentraler Bedeutung, da das Konzept des Agenten die direkte Kontrolle der Handlungen eines anderen Agenten nicht erlaubt. Ein Agent ist daher auf Nachrichten respektive Sprechakte angewiesen, um die Handlungen oder den Wissensstand eines anderen Agenten zu beeinflussen, wobei der empfangende Agent stets

⁶⁹ Vgl. Ferber (2001): Multiagentensysteme, S. 100 ff.

⁷⁰ Vgl. ebenda, S. 103 ff.

autonom entscheidet, ob er sich entsprechend der Intention des sendenden Agenten verhält.⁷¹

Zur Erläuterung der Sprechakttheorie hinsichtlich der Agentenkommunikation wird hier auf die Abhandlungen bei Wooldridge und Ferber verwiesen. Wichtig bleibt festzuhalten, dass für die Kommunikation zwischen Agenten eine Struktur für den Ablauf von Dialogen benötigt wird.⁷² Diese Struktur beruht auf Kommunikationsprotokollen. Für Agenten wurden die erforderlichen Standards durch „The Foundation of Intelligent Physical Agents“ (FIPA) definiert.

Für die Aufgabenverteilung unter den Agenten per Kommunikation kann beispielsweise das Contract Net Protocol verwendet werden. Es wurde in Anlehnung an die Ausschreibung von Aufträgen aufgestellt und beschreibt den Nachrichtenaustausch zwischen einem Kunden oder Auftraggeber und einer Menge von Dienstleistern oder Auftragnehmern. Als Ausgangspunkt sendet der Auftraggeber seine Auftragsbeschreibung an potentielle Auftragnehmer, die dann entscheiden, ob sie ein Angebot abgeben. Basierend auf den abgegebenen Angeboten wählt der Auftraggeber dann einen Auftragnehmer aus und informiert diesen über den Zuschlag.⁷³

Die Formalisierung dieses Verfahrens in Form eines Kommunikationsprotokolls durch FIPA ist in Abbildung 10 dargestellt und wird hier erläutert. Der Auftrag wird zunächst vom Auftraggeber (*Initiator*) mit einem Sprechakt vom Typ „*call for proposals – cfp*“ ausgeschrieben, worauf die Anbieter (*Participant*) mit den Sprechakten „*refuse*“ absagen oder mit „*propose*“ anbieten können. Der Auftraggeber sagt daraufhin einem Anbieter mit dem Sprechakt „*accept-proposal*“ zu und den anderen mit „*reject-proposal*“ ab. Der erfolgreiche Anbieter informiert den Auftraggeber schließlich mit einem der Sprechakte „*failure*“, „*inform-done*“ oder „*inform-result*“ über die Ausführung des Auftrags respektive eines möglichen Fehlschlags.

⁷¹ Vgl. Wooldridge (2002): Multiagentsystems, S. 163 f.

⁷² Vgl. Ferber (2001): Multiagentensysteme, S. 353

⁷³ Vgl. Wooldridge (2002): Multiagentsystems, S. 192 ff.

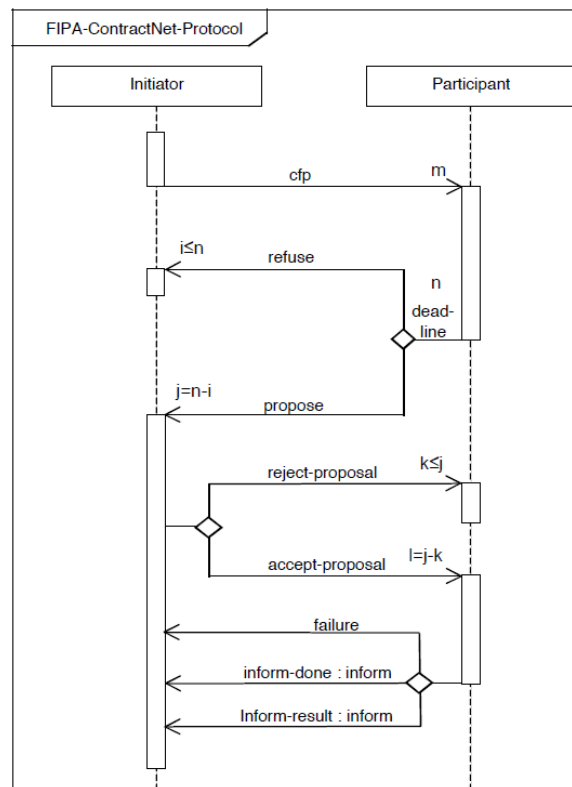


Abbildung 10: FIPA - Contract Net Interaction Protocol⁷⁴

Neben dieser hochentwickelten Form der direkten Kommunikation ist auch eine indirekte Kommunikation zwischen Agenten möglich. Dabei werden die Veränderung der Umwelt oder bestimmter Objekte, die ein Agent durch seine Handlungen verursacht, von anderen Agenten wahrgenommen, und diese können sich entsprechend verhalten.⁷⁵ Die indirekte Kommunikation kann bei der Modellierung von Montageprozessen angewendet werden, um die technologische Abfolge der auszuführenden Handlungen zu koordinieren.

2.1.3 Multiagentensimulation

Der Begriff der Multiagentensimulation kann entweder als eine Simulation verstanden werden, bei der einzelne Aufgaben des Simulationssystems auf Agenten übertragen werden, oder man versteht unter Multiagentensimulation die Nutzung eines agentenbasierten Modellierungsansatzes.⁷⁶ Im Rahmen dieser Arbeit wird

⁷⁴ FIPA (2002): Contract Net Interaction Protocol Specification, S. 2

⁷⁵ Vgl. Klügl (2002): Multiagentensimulation, S. 116 f.

⁷⁶ Vgl. ebenda, S. 67 f.

die Multiagentensimulation in Anlehnung an Klügl als Simulation auf Basis eines agentenbasierten Simulationsmodells verstanden. Dieses Modell ist ein Multiagentensystem in einer simulierten Umwelt und dient der Nachbildung eines realen Multiagentensystems. Ziel dieser Simulation ist das Experimentieren mit unterschiedlichen Szenarien eines Multiagentenmodells, um das reale System zu optimieren.

Das Zusammenspiel von Simulation und Multiagentensystemen kann außerdem in zwei Richtungen erfolgen. Zum einen kann die Modellbildung und Simulation dem Entwurf von agentenbasierten Softwaresystemen dienen. Zum anderen ist es möglich, das Konzept eines Multiagentensystems als Ausgangspunkt für die Modellierung realer Systeme anzuwenden.⁷⁷

2.1.3.1 Charakteristika der Multiagentensimulation

Viele Simulationsmodelle in den Ingenieur- und Naturwissenschaften basieren auf Gleichungssystemen, die die gegenseitige Beeinflussung globaler Zustandsvariablen des Systems respektive Modells abbilden. Bei der gleichungssystembasierten Modellierung komplexer Systeme, die aus Individuen bestehen, bleiben mehrere Aspekte ungelöst. So ist nur eine globale Perspektive auf das System möglich, und die Aktionen und Interaktionen einzelner Akteure können nicht abgebildet werden.⁷⁸

Die Multiagentensimulation ermöglicht dagegen die detaillierte Modellierung des Verhaltens und der Interaktion einzelner Entitäten auf dem Mikrolevel des Modells. Diese Aktionen auf dem Mikrolevel haben durch die Einbettung der Agenten in ihre Umwelt Auswirkungen auf das simulierte Multiagentensystem als Ganzes, und ihre Auswirkungen können auf dem Makrolevel des Modells beobachtet werden.⁷⁹

Entsprechend den Klassifikationsmerkmalen einer Simulation aus Abschnitt 2.1.1.1 kann die Multiagentensimulation wie folgt charakterisiert werden:

- Ein Multiagentenmodell ist ein diskretes Modell, in dem Agenten als Entitäten abgebildet werden.

⁷⁷ Vgl. Michel et al (2009): Multi-Agent Systems and Simulation, S. 3 ff.

⁷⁸ Vgl. Ferber (2001): Multiagentensysteme, S. 56 ff.

⁷⁹ Vgl. Michel et al (2009): Multi-Agent Systems and Simulation, S. 9 ff.

- Der Raum und die Zeit, in denen die Agenten situiert sind, werden innerhalb der Umwelt des agentenbasierten Simulationsmodells repräsentiert.
- Die Skala und die Dimensionen des Raums können innerhalb der Grenzen der jeweiligen Programmiersprache vom Modellierer gewählt werden.
- Die Zeit wird in der Multiagentensimulation meist rundenbasiert modelliert.
- Die Determiniertheit einer Multiagentensimulation hängt von der Modellierung des Verhaltens der Agenten und der Umwelt ab. Deren Verhalten kann deterministisch oder stochastisch gestaltet werden.
- Die Multiagentensimulation ist eine mikroanalytische Simulation, die es erlaubt, das Verhalten der einzelnen Entitäten auf der Mikroebene sowie dessen Auswirkungen auf der Makroebene zu beobachten.

Bedeutsam ist, dass das Systemverhalten in einem Multiagentenmodell nicht durch algebraische Gleichungssysteme oder Differentialgleichungen beschrieben wird. Stattdessen werden die Umwelt und das eigenständige Verhalten jedes Agenten durch Regeln in einem Aktivitätsdiagramm modelliert. Durch diese diskrete Modellierung ist es im Gegensatz zu kontinuierlichen Simulationsmodellen möglich, das Zusammenspiel der Mikro- und Makroebene des Systems zu analysieren.

Aufgrund der oben beschriebenen Unterschiede zwischen dem agentenbasierten Modellierungsparadigma und stärker mathematischen Ansätzen sprechen folgende Gründe für den Einsatz der Multiagentensimulation zur Simulation des Bauablaufs:

- In der Multiagentensimulation können einzelne Individuen unterschieden werden, so dass die individuelle Arbeitsleistung abgebildet werden kann.
- Die komplexen Interaktionen von Arbeitskräften und Geräten auf einer Baustelle lassen sich mit Multiagentensystemen gut modellieren.
- Multiagentensysteme können komplexe Entscheidungsprozesse und Handlungsmuster, die von lokalen und globalen Einflüssen abhängen, modellieren.
- Ein agentenbasiertes Modell kann im Gegensatz zu vielen Simulationsmodellen einen inhomogenen Raum, zum Beispiel ein Grundstück mit Wegen und Hindernissen, abbilden.⁸⁰

⁸⁰ Vgl. Klügl et al (2002): Multiagent modelling in comparison to standard modelling

Die nachfolgend aufgeführten Nachteile oder Probleme der Multiagentensimulation kommen bei der Bauablaufsimulation nicht zum Tragen:

- Die Multiagentensimulation wäre nicht einsetzbar, wenn es nicht möglich ist, Agenten zu identifizieren. Die Akteure beim Bauablauf sind aber bekannt.
- Die formale Analyse eines agentenbasierten Modells ist nur schwer möglich. Jedoch ist dies für die Bauablaufsimulation nicht unbedingt erforderlich.
- Mathematische Modelle wären vorzuziehen, wenn ein sehr großer Raum oder eine große Anzahl an Entitäten durch homogene Abstraktionen modelliert werden kann. Dies ist beim Bauablauf nicht der Fall.⁸¹

2.1.3.2 Werkzeuge für die Multiagentensimulation

Für den Einsatz der Multiagentensimulation wird eine Reihe von Werkzeugen benötigt. Zwingend erforderlich ist Software zur Implementierung und Ausführung lauffähiger Simulationsmodelle. Um die Nachvollziehbarkeit der Modellierung zu erhöhen, wird eine verständliche Form zur Darstellung abstrakter Multiagentenmodelle benötigt. Diese abstrakte Modelliersprache sollte in direkter Beziehung zur späteren Implementierung stehen, um Transformationsfehler zu minimieren. Ein umfassendes Simulationswerkzeug sollte außerdem den Anwender beim Vorbereiten und Auswerten der Experimente unterstützen. Beispielsweise sollte die Erzeugung von Szenarien und das Durchführen der Simulationsläufe automatisiert werden. Die Simulationsergebnisse sind in gängigen Datenformaten zu dokumentieren.

Im Sinne des oben beschriebenen Qualitätsmanagements für die Simulation ist das Vorgehen bei der Modellierung und dem Experimentieren zu strukturieren. Dabei werden die einzelnen Tätigkeiten der Simulation sowie die dazu erforderlichen Werkzeuge erfasst und in einem Vorgehensmodell systematisiert.

Oechslein hat ein Vorgehensmodell speziell für die Multiagentensimulation entworfen, wobei er insbesondere Nicht-Informatiker respektive Experten bezüglich des zu simulierenden Realsystems als Zielgruppe sieht.⁸² Dieses Vorgehensmodell beschreibt nicht nur die einzelnen Simulationsschritte, sondern stellt auch Hilfsmittel zu deren Umsetzung zur Verfügung. Das Vorgehensmodell nach Oechslein

⁸¹ Vgl. ebenda

⁸² Vgl. Oechslein (2004): Vorgehensmodell [...] für Multiagentensimulationen, S. 10

gliedert sich wie in Abbildung 11 dargestellt in die Analyse, Spezifikation, Implementierung und Kalibrierung des Simulationsmodells sowie die Experimentation mit diesem.



Abbildung 11: Phasen des Vorgehensmodells nach Oechslein⁸³

Im Rahmen der Analyse der Simulationsaufgabe wird ein Konzeptmodell erarbeitet, das die Fragestellung dokumentiert und erste Festlegungen zu den Systemgrößen, den Elementen und der Organisation des Multiagentenmodells trifft sowie die auszuführenden Experimente festlegt. In der nachfolgenden Spezifikationsphase werden diese Festlegungen mit Hilfe einer formalen Darstellung konkretisiert, und man erhält ein abstraktes Modell, das als Grundlage für die Implementierung dient. Durch die Implementierung wird das abstrakte Multiagentenmodell in ein lauffähiges agentenbasiertes Simulationsmodell transformiert. Dessen Modellgrößen werden dann im Rahmen der Kalibrierung so eingestellt, dass das Modellverhalten dem Verhalten des realen Systems möglichst nahe kommt. Zum Schluss erfolgt dann die Durchführung der Experimente mit dem kalibrierten Simulationsmodell.⁸⁴

Im Rahmen dieser Arbeit wird die Simulationsumgebung SeSAM (**Shell for Simulated Agent Systems**) verwendet. Es handelt sich um eine vollständige Entwicklungsumgebung für die Multiagentensimulation, die Hilfsmittel aus dem oben beschriebenen Vorgehensmodell von Oechslein integriert. SeSAM besitzt eine intuitive graphische Eingabe für die Modellierung und Experimentation und bietet die für die Umsetzung des im Rahmen dieser Arbeit aufgestellten baubetrieblichen Vorgehensmodells für die agenten- und ergonomiebasierte Bauablaufsimulation erforderlichen Funktionen. Einen umfassenden Überblick zu Simulationsmaschinen für die Multiagentensimulation geben Theodoropoulos et al.⁸⁵

Ein Multiagentensystem in SeSAM besteht wie in Abbildung 12 dargestellt aus Agenten, die eigene Zustandsvariablen und ein autonomes Verhalten besitzen sowie passiven Ressourcen, die lediglich Zustandsvariablen aufweisen. Alle Entitäten befinden sich in einer Umwelt, die ebenfalls eigene Zustandsvariablen und ein

⁸³ Vgl. ebenda, S. 51

⁸⁴ Vgl. Oechslein (2004): Vorgehensmodell [...] für Multiagentensimulationen, S. 53 ff.

⁸⁵ Vgl. Theodoropoulos et al (2009): Simulation Engines for Multi-Agent Simulation

eigenes Verhalten aufweist und zusätzlich den Raum und die Zeit repräsentiert, in der sich die Agenten und Ressourcen befinden.⁸⁶ Die Ausführung des Simulationsmodells in SeSAM erfolgt rundenbasiert, also in diskreten Zeitschritten. Die Repräsentation des Raums ist standardmäßig zweidimensional.^{87 88}

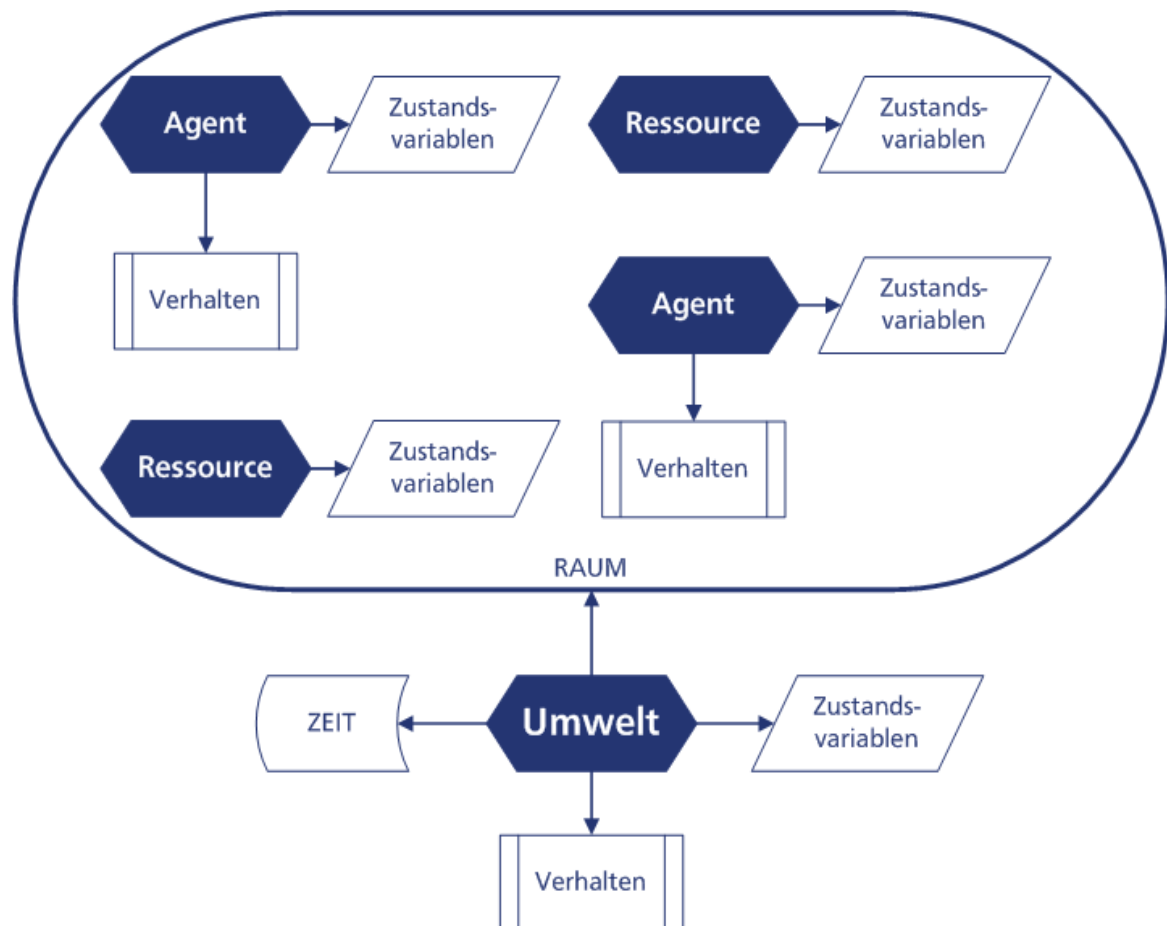


Abbildung 12: Schema eines Multiagentensystems⁸⁹

Zur Modellierung der Agenten und ihres Verhaltens dient die Spezifikationsprache SeSAM-UML, die aus Klassen- und Aktivitätsdiagrammen besteht. Sie basiert auf der objektorientierten Modellierungssprache UML (Unified Modelling Language), die eine einheitlich graphische Notation definiert. Klassendiagramme liefern eine allgemeine Beschreibung der Entitäten mit Zustandsvariablen, Verhaltensweisen sowie Invarianten, Vor- und Nachbedingungen. Die Aktivitätsdiagramme

⁸⁶ Vgl. Oechslein (2004): Vorgehensmodell [...] für Multiagentensimulationen, S. 53

⁸⁷ Vgl. Lehrstuhl für Künstliche Intelligenz [...]: www.simsesam.de, Aufruf: 5.7.2010

⁸⁸ Vgl. Theodoropoulos et al (2009): Simulation Engines for Multi-Agent Simulation

⁸⁹ eigene Darstellung

dienen der Spezifikation des Verhaltens der Agenten mit Hilfe von Aktivitäts-, Zustands- und Interaktionsknoten sowie Übergangskanten.⁹⁰

Die Erzeugung eines lauffähigen Multiagentenmodells auf Basis von SeSAM-UML geschieht mit der Implementierungssprache SeSAM-IMPL.⁹¹ Dabei erzeugt man Umwelt, Agenten und Ressourcen als allgemeine Klassen im Sinne der objektorientierten Modellierung. Im Rahmen der Aufstellung von Ausgangssituationen für Simulationsexperimente erfolgt die Definition konkreter Ausprägungen dieser Klassen, die als Instanzen bezeichnet werden. Dazu wird in SeSAM in so genannten Situationen die Startkonfiguration des Multiagentenmodells für einen Simulationslauf festgelegt. Der Verlauf jedes Simulationslaufs kann dann in einer Animation während der Laufzeit beobachtet werden. Außerdem ist es möglich, mit einem Analysewerkzeug gezielt Daten während des Simulationslaufs zu erfassen und für die Auswertung in Dateien oder Graphen auszugeben.⁹²

2.2 Eine systemoffene Schnittstelle für den Informationsaustausch im Baubetrieb

Bei Bauprojekten ist eine Vielzahl an Daten und Informationen auf die Projektbeteiligten sowie deren Softwaresysteme verteilt und muss ausgetauscht werden.⁹³ Für eine optimale Projektabwicklung ist der Informationsfluss zwischen den Beteiligten und ihrer Software von zentraler Bedeutung. Denn nur durch den schnellen Austausch von Informationen über die Soll- und Ist-Größen eines Projektes ist ein zeitnahe Soll-Ist-Vergleich und damit eine wirksame Kontrolle und Steuerung der Bauprozesse möglich.⁹⁴ Außerdem steigt der Nutzen von IT-Anwendungen wie Simulationswerkzeugen beim gemeinsamen Zugriff auf Informationen, da identische Sachverhalte nicht mehrfach eingegeben werden müssen.

Durch die meist proprietäre Datenhaltung der einzelnen IT-Systeme und lückenhafte oder gänzlich inkompatible Austauschformate ist der Austausch von digitalen Informationen in Bauprojekten heute nur mit erheblichem Zusatzaufwand möglich. Daher sollen hier die Grundlagen für den Austausch von Informationen über Leistungserstellungsprozesse auf Baustellen dargestellt werden. Basierend

⁹⁰ Vgl. Oechslein (2004): Vorgehensmodell [...] für Multiagentensimulationen, S. 78 ff.

⁹¹ Vgl. ebenda, S. 93 ff.

⁹² Vgl. Oechslein (2004): Vorgehensmodell [...] für Multiagentensimulationen, S. 130 ff.

⁹³ Vgl. Kochendörfer et al (2010): Bau-Projekt-Management, S. 89 f.

⁹⁴ Vgl. Heim (2002): Die zeitnahe Leistungsfeststellung von Baustellen, S. 49

auf diesen wird in Kapitel 4 ein Datenmodell formuliert, das in Kapitel 5 zum Informationsaustausch in der Planung, Kontrolle und Steuerung von Montageprozessen verwendet wird.

2.2.1 Beschreibung einer geeigneten Schnittstelle

Die Definition einer funktionalen Schnittstelle zum elektronischen Austausch von Termindaten und anderen Kenngrößen der Bauprozesse stellt ein wichtiges Ziel dar. Im Folgenden wird zunächst die Bedeutung einiger wichtiger Begriffe im Rahmen dieser Arbeit geklärt, um dann die Anforderungen an eine Schnittstelle für Termindaten zu beschreiben.

Die Interoperabilität einer Software beschreibt deren Fähigkeit zur plattformübergreifenden Kooperation mit anderen Systemen.⁹⁵ Unter einer Schnittstelle wird in diesem Kontext die Interaktion von Softwaresystemen in einem Kommunikationsmodell verstanden.⁹⁶ Als ein Mittel zur Erreichung von Interoperabilität der Schnittstellen unterschiedlicher Software können nicht-proprietäre Datenformate eingesetzt werden. Diese sind im Gegensatz zu proprietären Datenformaten nicht durch Lizenzen oder Patente beschränkt, können daher frei genutzt werden und folgen allgemein anerkannten Standards. Ziel ist dabei der verlustfreie Austausch von Daten bzw. Informationen. Unter Daten werden dabei Zeichen verstanden, die einer Syntax folgen und die zusammen mit ihrer semantischen Struktur Informationen wiedergeben.⁹⁷

Die Anforderungen an eine Schnittstelle für Termindaten ergeben sich aus dem Kontext der Bauprojekte, den zu kommunizierenden Informationen und der geplanten Nutzung der Daten bzw. Informationen. Da in jedem Bauprojekt wechselnde Partner für einen beschränkten Zeitraum zusammenarbeiten, muss die Schnittstelle in der Lage sein, unterschiedliche Programme mit minimalem Aufwand zu verbinden. Die Informationen selbst bestehen aus Terminen, Dauern, Abhängigkeiten und Ressourcen, die bestimmten Leistungserstellungsprozessen zugeordnet sind. Sie können nach ihrem Erstellungszeitpunkt und ihrer Form unterschieden werden und liegen zunächst in unterschiedlicher Form vor. So entstehen im Vorfeld der Bauausführung Ablaufpläne, die auf bestimmten Annahmen beruhen, während zu definierten Zeitpunkten der Baufortschritt detektiert werden kann. Um all diese Facetten der Termindaten abbilden zu können, muss die

⁹⁵ Vgl. Fischer, Hofer (2008): Lexikon der Informatik, S. 416

⁹⁶ Vgl. ebenda, S. 737

⁹⁷ Vgl. North, Güldenbergh (2008): Produktive Wissensarbeit(er), S. 25

Schnittstelle die Möglichkeit bieten, die Daten zu strukturieren, untereinander zu verknüpfen und mit Attributen zu versehen. Die Nutzung der Termindaten im Rahmen der Planung, Kontrolle und Steuerung sowie Dokumentation der Bauprozesse umfasst das Gegenüberstellen, Analysieren, Nutzen und Ablegen der verfügbaren Informationen. Die Schnittstelle soll daher eine flexible Nutzung eines möglichst umfassenden Datenpools ermöglichen.

Als Kern kann man damit folgende Anforderungen an eine Schnittstelle formulieren:

- Integration unterschiedlicher Software als Quelle und Senke von Daten
- Strukturierung, Verknüpfung und Attributierung der Daten
- Flexible Nutzbarmachung einer umfassenden Datensammlung

Basierend auf den dargestellten Anforderungen und der geplanten Nutzung der Schnittstelle für Termindaten kann eine geeignete Schnittstelle identifiziert werden. Um die Forderung nach der Integration unterschiedlichster Programme zu gewährleisten, ist es sinnvoll, ein nicht-proprietäres Dateiformat zu nutzen. Dieses kann dann als Basis zur Definition der Interaktion unterschiedlichster Softwaresysteme dienen. Zur ebenfalls geforderten Strukturierung der Daten bieten sich Auszeichnungssprachen an. Aus diesen beiden Aspekten lässt sich die Wahl der freien, vom W3C (World Wide Web Consortium) empfohlene Auszeichnungssprache XML (Extensible Markup Language) ableiten. Um in XML eine computerlesbare Verknüpfung und Attributierung der Daten vornehmen zu können, wird auf das Datenmodell von RDF (Resource Description Framework) zurückgegriffen, das in XML-Syntax formuliert werden kann.

Der Austausch von Informationen im Datenmodell von RDF in XML-Syntax erfüllt die oben gestellten Anforderungen an die Schnittstelle. Allerdings definiert dies nur ein kompatibles Austauschformat. Eine automatisierte Interoperabilität kann nur erreicht werden, wenn alle Programme auf dieselbe Datei in einem Netzwerk zugreifen können, denn ein Austausch von Dateien oder eine direkte Kommunikation von Softwaresystemen ist nicht vorgesehen. Bei autonom handelnder Software wie zum Beispiel einem Agentensystem, die zukünftig immer größeren Einfluss haben wird, ist aber genau dies erforderlich. Daher ist es sinnvoll, die Termindaten direkt in eine entsprechend nutzbare Datenstruktur einzubetten. Dabei handelt es sich um Ontologien, die die Daten in eine maschinenlesbare Semantik integrieren, eine agentenbasierte Kommunikation ermöglichen und als Grundlage für wissensbasierte Systeme dienen können. Als Basis hierfür bietet sich die am Institut für Baubetrieb der TU Darmstadt unter Mitwirkung des Autors aufgestellte prozesszentrierte, baubetriebliche Ontologie an. Sie hat das vom W3C empfohlene Format OWL-DL, das auf XML und RDF basiert.

2.2.2 Ontologien in der Informatik

Nachdem oben eine Ontologie als geeignete Umsetzung der Schnittstelle für Terminate aus gewählt wurde, wird im Folgenden das Konzept der Ontologien in der Informatik kurz dargestellt werden. Die gängigste Definition von Ontologien in der Informatik lieferte Gruber, der von der expliziten Spezifikation einer gemeinsamen Konzeptualisierung spricht.⁹⁸ Dies bedeutet, dass eine Ontologie Metadaten in einer formalen Struktur bereitstellt, die es einer Software ermöglicht, die entsprechenden Daten eigenständig zu strukturieren und zu interpretieren.⁹⁹ Das Kontextwissen, das es einem Domänenexperten erlaubt, aus Daten seines Fachgebiets Informationen und Wissen abzuleiten, erhält die Maschine in Form einer Ontologie. Dabei wird von Ontologien im Plural gesprochen, da beliebige Interessengruppen für ihre Domäne eine eigene Ontologie aufstellen und zur Zusammenarbeit ihrer Software nutzen können.

Das Ziel der Aufstellung und Verwendung von Ontologien in der Informatik ist nach Gruninger und Lee zum einen die Kommunikation zwischen verschiedenen Softwareprogrammen, zwischen Menschen und deren Organisationen sowie an der Mensch-Maschine-Schnittstelle und zum anderen das automatische Schlussfolgern sowie die Wiederverwendung des einmal formulierten Wissens.¹⁰⁰ Es geht also um die Formulierung computerlesbarer Strukturen mit dem Ziel, Softwarewerkzeuge zu befähigen, Daten und deren Semantik selbstständig auszutauschen und weiterzuverwenden. Hieran sind die Bereiche der Künstlichen Intelligenz und der Informationssysteme innerhalb der Informatik interessiert, die autonome, intelligente Agenten oder ein semantisches Internet erschaffen wollen.

2.2.2.1 Formate und Strukturen der Ontologien

Gegenwärtig ist das Format OWL (Web Ontology Language) als Empfehlung des W3C ein allgemein akzeptierter Standard. Als Basis zur Entwicklung von OWL diente der Web-Ontology Working Group die Vereinigung des amerikanischen Ontologieformats DAML (DARPA Agent Markup Language) mit seinem europäischen Gegenstück OIL (Ontology Inference Layer).¹⁰¹ Eine Empfehlung für OWL

⁹⁸ Vgl. Gruber (1993): Toward Principles for the Design of Ontologies Used for Knowledge Sharing

⁹⁹ Vgl. Hesse (2002): Ontologie(n)

¹⁰⁰ Vgl. Gruninger, Lee (2002): Ontology – applications and design

¹⁰¹ Vgl. Dan Connolly et al: Web-Ontology (WebOnt) Working Group

wurde am 10. Februar 2004 verabschiedet, enthält sechs Dokumente und beschreibt drei OWL-Teilsprachen.¹⁰²

Eine Ontologie im Format OWL ist entsprechend der in Abbildung 13 dargestellten Struktur der W3C-Formate für das Semantic Web eine Erweiterung von RDF (Ressource Description Frameworks). Wie in RDF wird jede einzelne Aussage über ein Triple bestehend aus Subjekt, Prädikat und Objekt ausgedrückt. So kann man beispielsweise sagen: „Baugeräteführer istEine Arbeitskraft“, wobei der „Baugeräteführer“ das Subjekt ist, die Aussage „istEine“ das Prädikat und die „Arbeitskraft“ das Objekt. Diese grundsätzliche Struktur der Informationsspeicherung lässt sich durch eine standardisierte XML-Syntax abbilden und ist somit für die Interoperabilität von Systemen gut geeignet.

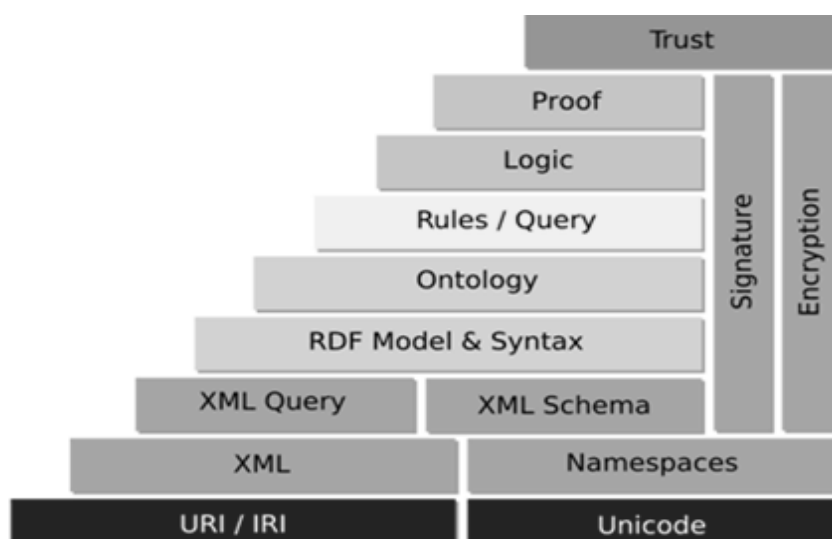


Abbildung 13: W3C-Datenstruktur dargestellt als "Semantic Web Layer Cake"¹⁰³

Das Ontologieformat OWL bietet drei Teilsprachen an, die aufeinander aufbauen und eine aufsteigende Ausdrucksmächtigkeit besitzen. OWL Lite ist die ausdruckschwächste OWL-Teilsprache, bietet dafür aber die Vorteile der Entscheidbarkeit bei minimaler Komplexität und der einfachen Implementierbarkeit. OWL DL ist ausdrucksmächtiger als OWL Lite, aber dennoch entscheidbar, und wird von den meisten Softwarewerkzeugen unterstützt. „DL“ steht dabei für Description Logic und verweist darauf, dass OWL DL mit Hilfe von Schlussfolgerungsalgorithmen eines so genannten Reasoners auf Konsistenz geprüft werden kann und es möglich ist, die Klassenzugehörigkeiten automatisch zu schließen. OWL Full ist die aus-

¹⁰² Vgl. McGuinness, van Harmelen [Hrsg.]: OWL Web Ontology Language

¹⁰³ Aus: Simmons, James (2010): Semantic Focus

drucksmächtigste Teilsprache von OWL, enthält aber eine für die Logik und das automatisierte Schlussfolgern teilweise problematische Semantik und ist daher nicht entscheidbar.^{104 105}

Für die prozesszentrierte, baubetriebliche Ontologie wird, wie bereits erwähnt, die Teilsprache OWL DL verwendet, da erstens eine Vielzahl von Softwarewerkzeugen dieses Format unterstützt und zum anderen die Entscheidbarkeit wichtiger ist als die zusätzliche Ausdrucksmächtigkeit von OWL Full.

Aktuell wurde am 27. Oktober 2009 vom W3C eine Empfehlung für OWL 2 verabschiedet. Hierbei handelt es sich um eine Weiterentwicklung, die auf den Erkenntnissen aus der Nutzung des ursprünglichen OWL-Formats beruht. Grundsätzlich ist OWL 2 rückwärtskompatibel mit OWL, enthält aber Alternativen bei der Syntax, Neuerungen in der Funktionalität und Definitionen neuer Profile.¹⁰⁶ Aufgrund der noch geringen Auswahl an Werkzeugen zur Arbeit mit OWL 2 wird im Rahmen dieser Arbeit weiterhin das ursprüngliche Format OWL DL verwendet, dessen künftige Kompatibilität auch bei Verbreitung von OWL 2 gesichert ist.

Als Grundbausteine der Ontologiestruktur dienen Klassen, Properties und Individuen, die in RDF-Tripeln formuliert werden.¹⁰⁷ Klassen beschreiben dabei die Konzepte einer Ontologie und besitzen eine Hierarchie, in der die Metaklassen ihre Spezifikationen an die Subklassen vererben. Die Properties beschreiben die Klassen, indem sie sie untereinander verknüpfen und ihnen Daten zuweisen.¹⁰⁸ Bei den Properties handelt es sich um die Prädikate der oben beschriebenen RDF-Triple, während die Klassen als Subjekte und ggf. auch Objekte fungieren. Die Individuen sind schließlich konkrete Ausprägungen eines Konzepts und beinhalten im Rahmen ihrer Klasse spezifische Daten.¹⁰⁹

Zur Erweiterung der Ontologiestruktur und für die Nutzung des automatischen Schlussfolgerns ist in OWL DL das Aufstellen von Restriktionen für die Properties einer Klasse möglich. Durch diese Einschränkung der mit bestimmten Properties formulierbaren Triple wird deren Aussagekraft erhöht.¹¹⁰ Mit Hilfe notwendiger und hinreichender Bedingungen für die Klassenzugehörigkeit ist es schließlich

¹⁰⁴ Vgl. Hitzler et al (2008): Semantic Web, S. 127

¹⁰⁵ Vgl. ebenda, S. 151 ff.

¹⁰⁶ Vgl. W3C OWL Working Group: OWL 2 Web Ontology Language Document Overview

¹⁰⁷ Vgl. Hitzler et al (2008): Semantic Web, S. 129 ff.

¹⁰⁸ Vgl. Noy, McGuinness: Ontology Development 101: A Guide to Creating Your First Ontology

¹⁰⁹ Vgl. McGuinness, van Harmelen [Hrsg.]: OWL Web Ontology Language

¹¹⁰ Vgl. Horridge et al (2004): A practical Guide to Building OWL Ontologies ..., S. 39 ff.

möglich, eine Hierarchie der Klassen und Individuen automatisch mit dem Reasoner abzuleiten. Diese Bedingungen basieren auf Properties, beschreiben die Klasse und beschränken die Klassenzugehörigkeit von Individuen. Das Schlussfolgern der Klassenzugehörigkeit funktioniert für alle definierten Klassen, die mindestens eine notwendige und hinreichende Bedingung besitzen.¹¹¹

Um mit Hilfe von Ontologien die Integration von Daten und Informationen über verschiedenste Softwareanwendungen und Nutzergruppen zu ermöglichen, ist es notwendig, dass Konzepte identisch benannt und interpretiert werden. Da sich die Zusammenführung verschiedener Ontologien als schwierig oder gar unmöglich erweisen kann, wird stattdessen die Verwendung einer gemeinsamen Top-Level-Ontologie angestrebt. Sie vererbt ihre Konzepte und deren Spezifikationen an speziellere Ontologien, die dadurch stets eine gemeinsame Basis zum Austausch der entsprechenden Daten besitzen.¹¹² Die Vererbung ist in OWL möglich, in dem in der Sub-Ontologie per URI auf die Meta-Ontologie verwiesen wird, so dass die RDF-Triple zur Beschreibung der Ontologie aus der Meta- und der Sub-Ontologie gemeinsam geladen werden. Dies ist auch für die getrennte Speicherung von Fakten und den zugehörigen Konzepten in so genannten ABoxen und TBoxen nutzbar. Die ABox enthält die zugrundeliegenden Behauptungen bzw. Daten (engl.: assertions), während in der TBox die Terminologie bzw. die Konzepte (engl.: terminology) gespeichert werden.

2.2.2.2 Vorgehensweise und Werkzeuge zur Erstellung von Ontologien

Beim Erstellen einer Ontologie geht es darum, die Konzepte eines bestimmten Gebiets oder einer bestimmten Aufgabe zu benennen und miteinander in Beziehung zu setzen. Da meist eine Kommunikation basierend auf der Ontologie geplant ist oder die Ontologie später wiederverwendet werden soll, ist es sinnvoll, beim Aufstellen einer Ontologie zusammen zu arbeiten. Neben der Zusammenarbeit ist eine strukturierte Vorgehensweise sinnvoll, um klare Strukturen und eine hohe Allgemeingültigkeit der Ontologie zu erreichen. Im Folgenden wird daher ein kurzer Überblick zu den entsprechenden Methoden und Techniken zum Aufstellen von Ontologien in der Informatik sowie den zugehörigen Werkzeugen gegeben.

Grundsätzlich lassen sich drei unterschiedliche Herangehensweisen bei der Aufstellung einer Ontologie unterscheiden: Beim Bottom-up-Ansatz werden zunächst die spezifischsten Begriffe beschrieben, um diese dann mittels passender Überbe-

¹¹¹ Vgl. ebenda, S. 57 ff.

¹¹² Vgl. Guarino (1998): Formal Ontology and Information Systems

griffe zu gruppieren. Das entgegengesetzte Vorgehen, bei dem zunächst allgemeine Begriffe festgelegt und dann differenziert werden, bezeichnet man als Top-down. Als dritte Variante ist der Middle-out-Ansatz zu nennen, bei dem die wichtigsten Begriffe bestimmt und von diesen ausgehend eine Verallgemeinerung und Differenzierung vorgenommen wird.¹¹³

Eine allgemeingültige und häufig zitierte^{114 115} Vorgehensweise wurde von Noy und McGuinness an der Stanford University entwickelt, wobei die beiden Autorinnen betonen, dass es nicht den einen richtigen Weg gibt und es sich stets um einen iterativen Prozess handeln wird. Als Richtschnur werden im Folgenden die sieben Schritte zum Aufstellen einer Ontologie in Abbildung 14 schematisch dargestellt und erläutert.



Abbildung 14: Sieben Schritte zur Aufstellung einer Ontologie nach Noy und McGuinness¹¹⁶

Als erstes ist zu klären, welches Fachgebiet die Ontologie abbilden soll und welchen Umfang sie haben wird. Im Rahmen dieser Festlegung sind auch direkt Kompetenzfragen zur späteren Prüfung der Vollständigkeit der Ontologie zu formulieren. Im zweiten Schritt ist dann zu prüfen, ob bestehende Ontologien ganz oder teilweise die benötigten Konzepte spezifizieren und inwiefern diese genutzt werden können. Ist dies nicht oder nur teilweise möglich, besteht die Aufgabe darin, wichtige Begriffe zu sammeln, um dann aus ihnen eine Klassenhierarchie aufzustellen. Zur genaueren Beschreibung der Klassen werden danach Properties er-

¹¹³ Vgl. Uschold, Grüninger (1996): Ontologies: principles, methods and applications

¹¹⁴ Antoniou, van Harmelen (2004): A Semantic Web Primer, S. 205 ff.

¹¹⁵ Schönbein (2005): Agenten- und ontologiebasierte Softwarearchitektur [...], S. 80

¹¹⁶ Vgl. Noy, McGuinness: Ontology Development 101: A Guide to Creating Your First Ontology

zeugt, die die Klassen untereinander oder mit Daten verknüpfen. Nachdem diese Properties mittels Restriktionen näher beschrieben wurden, werden im letzten Schritt die Individuen als konkrete Ausprägung der Klassen respektive Konzepte erzeugt.

Als Ergänzung des oben beschriebenen siebenstufigen Vorgehens sollen noch einige weitere Aspekte zur guten Praxis des Modellierens aufgezeigt werden. Ein Kernelement von Ontologien in OWL DL ist die Möglichkeit, die Klassenzugehörigkeit über notwendige und hinreichende Bedingungen abzuleiten. Dieses Ableiten einer Hierarchie beweist die maschinenlesbare semantische Aussagekraft der einzelnen Klassen und sichert deren Stimmigkeit und Tauglichkeit.¹¹⁷ Neben dem Aufstellen neuer Ontologien sollte auch deren gesamter Lebenszyklus betrachtet werden, in dem die Weiterentwicklung und Verknüpfung mit anderen Ontologien im Fokus steht.¹¹⁸

Um entsprechende Irrwege zu vermeiden, sollen auch einige typische Modellierfehler aufgezeigt werden, welche die Wieder- und Weiterverwendbarkeit von Ontologien einschränken: Zum einen sollte nicht alles als Klasse definiert werden, sondern Klassen sollen eine Gruppe von Individuen zusammenfassen, weshalb Klassennamen stets im Plural stehen. Zum anderen muss stets der AAA Slogan beachtet werden, wonach jeder (anyone) alles (anything) über jedes Thema (any topic) sagen kann und darf. Dies führt in Verbindung mit der Offenen-Welt-Annahme dazu, dass beispielsweise die Zugehörigkeit zu einer Subklasse, deren Metaklasse ungenau beschrieben wurde, leicht zum falschen Ableiten der Klassenhierarchie führen kann. Daher auch die Warnung davor, einer Klasse einen Wunschnamen zu vergeben, der nicht mit den semantischen Aussagen in der Ontologie übereinstimmt.¹¹⁹

Die Software-Werkzeuge für Ontologien lassen sich entsprechend ihrer Funktionalität in folgende Gruppen einteilen: Entwicklungswerkzeuge, Evaluationssoftware, Werkzeuge zur Mischung und Angleichung von Ontologien, Software zur ontologiebasierten Kommentierung, Anfrage- und Inferenzwerkzeuge sowie Werkzeuge zur halbautomatischen Ontologieerzeugung.¹²⁰ Hier sollen nur Werkzeuge zur Entwicklung von Ontologien betrachtet werden. Sie müssen den Standard OWL-DL in

¹¹⁷ Vgl. Allemang, Hendler (2007): *Semantic Web for the Working Ontologist*, S. 273 ff.

¹¹⁸ Vgl. Gomez-Pérez et al (2004): *Ontological Engineering*, S. 195 f.

¹¹⁹ Vgl. Allemang, Hendler (2007): *Semantic Web for the Working Ontologist*, S. 277 ff.

¹²⁰ Vgl. Gomez-Pérez et al (2004): *Ontological Engineering*, S. 293 ff.

XML-Syntax beherrschen, sollten eine graphische Benutzeroberfläche anbieten sowie Plugins für z.B. Reasoner, Anfragesprachen und Schlussfolgerungsmaschinen anbieten, die die spätere Nutzung der Ontologie ermöglichen.

Das Software-Werkzeug zur Entwicklung von Ontologien mit dem größten Verbreitungsgrad ist derzeit das von der Stanford University entwickelte Protégé, das in der Version 3.4.1 OWL DL mit XML-Syntax unterstützt.¹²¹ Protégé 3.4.1 besitzt eine intuitiv zu bedienende graphische Benutzeroberfläche und ein großes Spektrum an Plugins. So werden u.a. die Reasoner Pellet und RACER sowie per Plugin SPARQL, SWRL und Jess unterstützt. Die Nachfolgeversion Protégé 4 befindet sich in der Entwicklung und unterstützt OWL 2. Wichtige Plugins, wie zum Beispiel der SWRLTab und der JessTab, sind aber im November 2009 noch nicht für Protégé 4 verfügbar. Für beide Protégé-Versionen gibt es eine ausführliche Dokumentation sowie ein Tutorial und mehrere Mailinglisten mit hilfreichen Archiven. Informationen zu beiden Versionen befinden sich auf der Protégé-Homepage: <http://protege.stanford.edu/>.

Daneben gibt es die in Karlsruhe und Manchester entwickelte Software KAON2, die OWL-DL und SWRL unterstützt und einen eigenen Schlussfolgerungsalgorithmus anstelle eines externen Reasoners nutzt.¹²² Nachteilig erscheinen hier das Fehlen einer Dokumentation bzw. eines Tutorials und die relative kleine Nutzer-gemeinde sowie die Tatsache, dass es keine ausgewiesene Schnittstelle für Plugins gibt. Außerdem gibt es die Software SWOOP, deren im November 2009 aktuellste Version aus dem August 2007 stammt und weiterhin als Betaversion bezeichnet wird.¹²³ SWOOP fehlt die Einbindung von Anfragesprachen und Regelmaschinen, und eine Weiterentwicklung scheint generell nicht mehr stattzufinden.

Des Weiteren gibt es von Altova mit Semantic Works ein kommerzielles Werkzeug zur Bearbeitung von OWL-Ontologien, das in eine breite Palette an Werkzeugen eingebunden ist.¹²⁴ Damit ergeben sich zwar einige interessante Synergien, aber die Vorteile des offenen Quellcodes und eine Schnittstelle für Plugins von Drittanbietern fehlen bei Semantic Works.

Vergleicht man die fünf oben beschriebenen Werkzeuge zur Entwicklung von Ontologien hinsichtlich der anfangs gestellten Anforderungen miteinander, so erscheint derzeit Protégé 3.4.1 als die beste Alternative. Der offene Quellcode und

¹²¹ Vgl. Gasevic et al (2009): Model Driven Engineering and Ontology, S. 62 f.

¹²² Vgl. AIFB et al: <http://kaon2.semanticweb.org/>, Aufruf am 10.11.2009

¹²³ Vgl. MIND Lab (2009): SWOOP – Semantic Web Ontology Editor

¹²⁴ Vgl. Altova (2009): SemanticWorks Semantic Web tool – Visual RDF and OWL editor

die breite Nutzerbasis garantieren eine kontinuierliche Weiterentwicklung, die Bereitstellung erforderlicher Plugins sowie die Einbindung anderer Werkzeuge wie Jess, Pellet usw.

2.2.3 Werkzeuge zum Arbeiten mit OWL-Ontologien

Im Rahmen der Entwicklung einer Ontologie werden in erster Linie die Klassen, Properties, Restriktionen und Bedingungen der TBox formuliert. Bei der Anwendung der Ontologie geht es dann häufig um das Füllen der ABox mit Fakten und Möglichkeiten, mit diesen zu arbeiten, sei es in Form einer Kommunikation, einer Neugruppierung oder des Schlussfolgerns. Hierzu sind u.a. Werkzeuge zum Ein- und Auslesen von Daten einer Ontologie erforderlich. Liegen Daten beispielsweise in einer anderen Syntax vor, so ist es erforderlich, diese in die Syntax der Ontologie zu transformieren. Zur Kommunikation und Sortierung von Daten ist es notwendig, entsprechende Anfragen an die Ontologie formulieren zu können. Die dazu erforderlichen Transformationsmechanismen und Anfragesprachen werden im Folgenden diskutiert.

2.2.3.1 Transformationsmechanismen

Die Festlegung eines Algorithmus zur Transformation bzw. Konvertierung von Daten aus einem Dateiformat in ein anderes ermöglicht die Zusammenführung von Daten aus unterschiedlichsten Quellen. Durch die Transformation werden die Daten aus einer beliebigen syntaktischen Struktur in die gewünschte Syntax umgewandelt. Dadurch wird es möglich, Daten unterschiedlichster Herkunft in die Ontologie zu integrieren, und die integrierten Daten erhalten neben der OWL XML-Syntax automatisch eine semantische Bedeutung.

Generell ist es möglich, Transformationen in einer beliebigen Programmiersprache, wie Java oder C#, umzusetzen. Es existiert aber auch die W3C-Empfehlung XSLT (Extensible Stylesheet Language Transformation), die auf dem Prinzip der Mustererkennung basiert. Der Begriff der „Stylesheet Language“ verweist dabei auf die Nutzung von XSLT, um Daten aus einer XML-Datei graphisch aufzubereiten, ist aber nicht die einzige Anwendungsmöglichkeit von XSLT.¹²⁵ Zur Identifikation der Muster in einem Dokument greift XSLT auf XPath zurück. XPath sieht

¹²⁵ Vgl. Tidwell (2002): XSLT – deutsche Ausgabe, S. 1 ff.

ein XML-Dokument als Baumstruktur an und ist in der Lage, mittels Lokalisierungspfaden bestimmte Einträge in einem XML-Dokument zu finden.¹²⁶

Basis eines XSLT-Dokuments sind Regeln bzw. Templates, die bei der Erkennung eines bestimmten Musters den entsprechenden Dokumentenabschnitt in einer vorher definierten Art und Weise umwandeln. Bei der Umformung entsprechend den Transformationsregeln werden ein oder mehrere Quelläste in ein oder mehrere Ergebnisäste umgewandelt.¹²⁷

Beim Einsatz von XSLT zur Transformation einer XML-Datei sind mindestens drei Dateien beteiligt. Die Quelldatei stellt die Daten in ihrer XML-Struktur zur Verfügung, so dass sie per XPath identifiziert werden können. Die Regeln zur Umwandlung der Daten und die dazu erforderliche Mustererkennung sind im XSLT-Dokument hinterlegt. Als Ergebnis wird eine Zieldatei mit den transformierten Daten im vorgegebenen Dateiformat erzeugt.

2.2.3.2 Anfragesprachen

Der Zugriff auf spezifische Informationen in einer Ontologie kann mittels unterschiedlicher Anfragesprachen erfolgen, die in der Lage sind, bestimmte Instanzen zu identifizieren und diese ggf. zu filtern oder zu sortieren. Meist ist darüber hinaus auch die Aufbereitung der Resultate möglich.¹²⁸ Im Folgenden werden SPARQL als Anfragesprache für RDF-Dokumente sowie SQWRL zur Formulierung von Anfragen an OWL-Ontologien vorgestellt.

Zur Informationsgewinnung aus RDF-Dokumenten wird vom W3C die Anfragesprache SPARQL (SPARQL Protocol and RDF Query Language) empfohlen. Diese kann RDF-Triple identifizieren und diese entsprechend weiterer Spezifikationen filtern, sortieren und formatieren. Die Identifikation bestimmter Elemente ist dabei durch die Einführung von Anfragevariablen möglich. Dies geschieht, indem ein Triple nicht nur URIs, sondern auch Platzhalter beinhalten kann, denen der Reasoner bei Anfragen dann konkrete Werte zuweist.^{129 130} So werden beispielsweise durch die in Abbildung 15 dargestellte Anfrage alle Prozesse und deren Status

¹²⁶ Vgl. Ebenda, S. 43 ff.

¹²⁷ Vgl. Kay (Hrsg.) (2007): XSL Transformations (XSLT) Version 2.0

¹²⁸ Vgl. Hitzler et al (2008): Semantic Web, S. 201

¹²⁹ Vgl. Hitzler et al (2008): Semantic Web, S. 202 ff.

¹³⁰ Vgl. Prud'hommeaux, Seaborne (2008): SPARQL Query Language for RDF

ausgegeben, sofern sie über die Property ‚bb:hasProzessStatus‘ miteinander verknüpft sind.

```
PREFIX <bb: http://ont.baubetrieb.ath.cx/BaubetriebOntologie.owl#>
SELECT ?prozess ?bauelement
WHERE { ?prozess bb:stelltBauteilHer ?bauelement. }
```

Abbildung 15: Beispiel einer SPARQL-Anfrage an eine ABox der Baubetrieb-Ontologie

SPARQL kann auf OWL-Ontologien angewendet werden, da OWL entsprechend des oben erläuterten Semantic Web Layer Cake auf dem Datenmodell von RDF basiert. Eine einfache Anwendung ist dadurch gegeben, dass Protégé 3.4.1 die Möglichkeit zur Ausführung von SPARQL-Anfragen bietet. Allerdings ist die Mächtigkeit von SPARQL durch den Umfang von RDF beschränkt.

SQWRL (Semantic Query-Enhanced Web Rule Language) ist eine Anfragesprache, die auf der Regelsprache SWRL, die als Regelsprache für OWL entwickelt wurde, basiert. Dabei werden die logischen Ausdrücke der Regelsprache verwendet, um die gesuchten Individuen in der Ontologie zu identifizieren. Regeln in SWRL bestehen dabei stets aus einem Antezedent, der die über Beziehungen verknüpften Bedingungen der Regel enthält und eine Konsequenz, die eintritt, sollten alle Bedingungen erfüllt sein.¹³¹ Da der Antezedent zur Identifikation eines bestimmten Musters dient, kann er auch zur Formulierung einer Anfrage genutzt werden. Um dies zu ermöglichen, bietet SQWRL einige Erweiterungen, durch die es möglich ist, als Konsequenz einer Regel die Auswahl, Sortierung oder Zählung der entsprechenden Individuen zu veranlassen.¹³²

Folgende Eigenschaften unterscheiden SQWRL von SPARQL:

- SQWRL-Anfragen basieren auf logischen Ausdrücken und werden in OWL abgespeichert, so dass sie direkt mit der Ontologie zur Verfügung gestellt werden.

¹³¹ Vgl. Sack (2009): Vorlesung Semantic Web – Teil 11 am HPI

¹³² Vgl. O'Connor (2009): The Semantic Web Rule Language

- Anfragen per SQWRL beziehen sich stets auf Individuen der ABox, also konkrete Fakten, die verwendet werden sollen, und nicht auf die übergeordneten Klassen zur Festlegung der Terminologie.

2.2.4 Die Ontologie der Baubetriebswissenschaften

Als Basis für die Kommunikation bezüglich Informationen über die Termine und Ressourcen von Montageprozessen wird im Rahmen dieser Arbeit die Ontologie der Baubetriebswissenschaften verwendet. Sie wurde am Institut für Baubetrieb der TU Darmstadt entwickelt, um die Kommunikation zwischen den Fraktionen in einem Bauprojekt zu verbessern. Im Fokus stehen die Objektivierung der verwendeten Begriffe und der Informationsaustausch zwischen Softwaresystemen. Das langfristige Ziel ist die Formulierung und Etablierung einer allgemein gültigen Ontologie der Baubetriebswissenschaften. Hierzu wird eine offene interaktive Weiterentwicklung der Ontologie unter Einbeziehung unterschiedlicher Fachsichten und Interessengruppen angestrebt.¹³³

Als Nukleus für die Formulierung der Darmstädter Ontologie für die Baubetriebswissenschaft wurde der Prozess gewählt. Das allgemeine Konzept des Prozesses wurde möglichst offen und flexibel definiert. Von besonderer Bedeutung ist die Reflexivität der Prozessbeschreibung, bei der jeder Prozess zugleich untergeordnete Subprozesse und übergeordnete Metaprozesse sowie Vorgänger- und Nachfolgerprozesse besitzt. Hierdurch ist es möglich, die für einen Prozess charakteristischen Input-Output-Beziehungen in einer beliebigen Granularität zu beschreiben. Zur Konkretisierung wurden darüber hinaus für den Produktionsprozess, wie in Abbildung 16 dargestellt, die Elemente des Arbeitssystems nach REFA als Eigenschaften eingeführt.¹³⁴

¹³³ Vgl. Motzko et al (2010): Eine Ontologie für die Baubetriebswissenschaft

¹³⁴ Vgl. ebenda

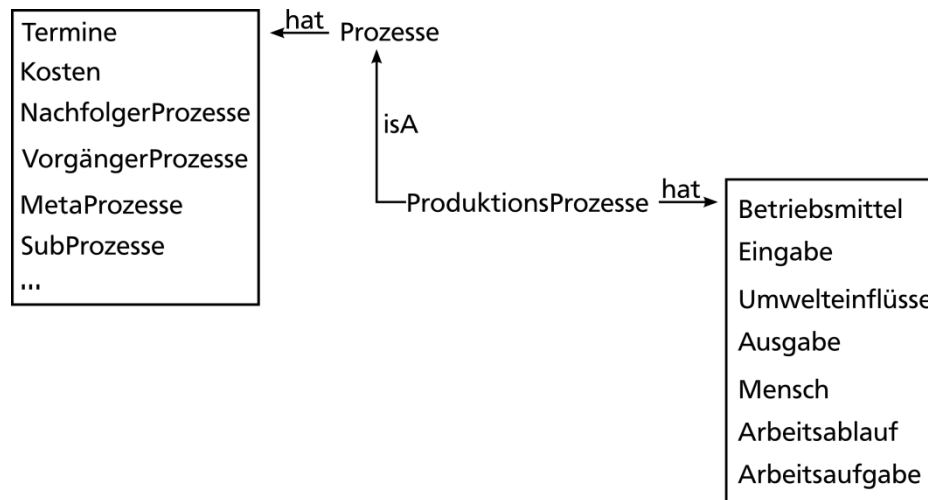


Abbildung 16: Modellierung des Konzepts „Produktionsprozesse“¹³⁵

Eine Möglichkeit zur Nutzung der hier vorgestellten Baubetriebsontologie ist die Interaktion von Softwaresystemen zur Simulation und Detektion von Bauprozessen. Dabei können Informationen über den geplanten und tatsächlichen Ressourceneinsatz sowie den zu erwartenden und eingetretenen Baufortschritt ausgetauscht werden.¹³⁶

¹³⁵ Aus: Motzko et al (2010): Eine Ontologie für die Baubetriebswissenschaft

¹³⁶ Vgl. Motzko et al (2010): Echtzeitsteuerung von Bauprozessen

Kapitel 3

Arbeitswissenschaftliche Grundlagen für das agentenbasierte Bauablaufmodell

3.1 Arbeitswissenschaftliche Aspekte der Terminplanung im Baubetrieb

Die baubetriebliche Terminplanung basiert auf der Anordnung von Vorgängen entsprechend technologischen und kapazitiven Abhängigkeiten sowie der Vorhersage der Dauern jedes Vorgangs. Eine wichtige Stellgröße bei der Terminplanung ist die Anzahl und Leistungsfähigkeit der eingesetzten Ressourcen. Die Dauer der einzelnen Vorgänge wird neben der auszuführenden Menge, dem gewählten Bauverfahren sowie den eingesetzten Arbeitskräften und Geräten von einer Vielzahl von Faktoren beeinflusst. Aus der Arbeitsumgebung spielen beispielsweise Witterungseinflüsse eine Rolle, und auch die Arbeitsvorbereitung sowie Organisation des Bauprojektes haben Einfluss auf den Bauablauf.

Eine zentrale Kenngröße stellt der Aufwandswert dar. Er beschreibt im Bauwesen den Verbrauch an Arbeitsstunden respektive Arbeitsaufwand je Mengeneinheit und entspricht damit der Zeit je Einheit nach REFA.^{137 138} Aufwandswerte können den ARH-Tabellen beziehungsweise der Fachliteratur entnommen werden oder basieren auf unternehmensinternen Daten abgeschlossener Projekte. Wichtig ist die Beschreibung der Arbeitsumstände, unter denen ein Aufwandswert ermittelt wurde respektive gültig ist, da das Leistungsangebot von den Arbeitskräften, der Arbeitsaufgabe und der Arbeitsumgebung abhängt.

¹³⁷ Vgl. Bauer (2007): Baubetrieb, S. 545

¹³⁸ Vgl. Berg (1984b): REFA in der Baupraxis – Teil 2: Datenermittlung, S. 34 ff

Modelle zur ganzheitlichen Leistungsberechnung existieren für den Geräteeinsatz und werden in der Baupraxis standardmäßig angewendet.^{139 140} Zur Quantifizierung der Veränderung von Aufwandswerten infolge unterschiedlicher Randbedingungen bei der Ausführung von handwerklichen Tätigkeiten im Rohbau oder bei Montagearbeiten liegen ebenfalls wissenschaftliche Ansätze vor. Diese werden allerdings in der gegenwärtigen Baupraxis selten angewendet, da die Arbeitsvorbereitung nicht mit den erforderlichen Kapazitäten und IT-Werkzeugen ausgestattet ist. Beispiele für die detaillierte Terminplanung unter Einbeziehung von Randbedingungen findet man vor allem in der Literatur zur Erstellung von Gutachten bei Bauzeitnachträgen.^{141 142}

Die in diesem Kapitel beschriebenen Grundlagen sollen daher genutzt werden, um Bauprozesse im Hinblick auf die Ergonomie und Leistung umfassend zu modellieren. Ziel ist es, ein ergonomisches Modell des Menschen und seines Leistungsangebots mit der in Kapitel 2.1 vorgestellten Multiagentensimulation zu implementieren. Das in dieser Arbeit entwickelte baubetriebliche Leistungs-Ermüdungsmodell wird in Kapitel 4.3 erläutert und zur Anwendung in der baubetrieblichen Simulation entsprechend dem Vorgehensmodell aus Kapitel 5 vorgeschlagen.

Im Folgenden werden das Arbeitssystem und die Strukturierung der Prozesse sowie deren Dauern dargestellt. Außerdem wird ein ergonomisches Modell des Menschen und der Situation, in der er arbeitet, vorgestellt sowie Zusammenhänge zwischen der Leistung eines Menschen mit seiner Beanspruchung, Ermüdung und Erholung beschrieben. Die existierenden baubetrieblichen Ansätze zur Berücksichtigung der Ergonomie in der Terminplanung werden vorgestellt. Abschließend folgt eine Erörterung der Modelle der Ergonomie im Hinblick auf ihre Nutzbarkeit für die Bauablaufsimulation.

¹³⁹ Vgl. Bauer (2007): Baubetrieb, S. 86 ff.

¹⁴⁰ Vgl. Girmscheid (2005): Leistungsermittlungshandbuch für Baumaschinen und Bauprozesse, S. 2 ff.

¹⁴¹ Vgl. Vygen et al (2008): Bauverzögerung und Leistungsänderung, S. 465 ff.

¹⁴² Vgl. Reister [Hrsg.] (2004): Nachträge beim Bauvertrag, S. 398 ff.

3.2 Systemische Analyse von Bauprozessen

Als Basis eines ergonomiegestützten Multiagentenmodells sind die Abläufe und Randbedingungen der Bauprozesse zu analysieren und systematisch zu beschreiben. Besonderes Augenmerk ist dabei auf die Dauern und deren Beeinflussung durch die Art und Umstände der Tätigkeiten zu legen. Beides erfordert die strukturierte Beobachtung und Beschreibung der Ausführung von Bauprozessen sowie deren zeitliche Erfassung durch Zeitaufnahmen respektive Multimomentaufnahmen nach REFA.

3.2.1 Das Arbeitssystem

Zur Beschreibung von Tätigkeiten und Arbeitsbedingungen ist in den Arbeitswissenschaften das Arbeitssystem etabliert.¹⁴³ Es handelt sich um ein sozio-technisches System, das heißt, die Systemelemente sind Menschen und Maschinen, die zueinander in Beziehung stehen. Als offenes System hat das Arbeitssystem eine Systemgrenze zur Umwelt, die allerdings durchlässig ist. Außerdem bietet die Modellierung als Arbeitssystem die Möglichkeit der Strukturierung, indem man eine Hierarchie aus Arbeitssystemen aufstellt oder Arbeitssysteme untereinander parallel oder in Reihe schaltet.¹⁴⁴

Nach REFA werden, wie in Abbildung 17 dargestellt, sieben Elemente eines Arbeitssystems unterschieden. Die Arbeitsaufgabe beschreibt den Zweck des Arbeitssystems und gibt vor, wie die Eingabe zu verändern respektive in die Ausgabe umzuwandeln ist. Diese Veränderung erfolgt im Arbeitsablauf, bei dem Mensch und Betriebsmittel zusammenwirken. Die Umwelteinflüsse beschreiben schließlich, wie die Umwelt auf das Arbeitssystem wirkt und umgekehrt.¹⁴⁵

¹⁴³ Vgl. Schlick et al (2010): Arbeitswissenschaft, S. 34 ff.

¹⁴⁴ Vgl. REFA (1978a): Methodenlehre des Arbeitsstudiums – Teil 1: Grundlagen, S. 69 ff.

¹⁴⁵ Vgl. ebenda, S. 70 f.

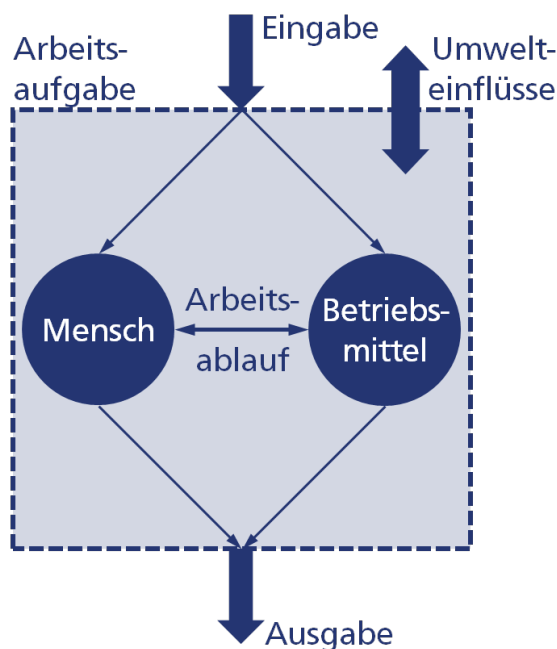


Abbildung 17: Das REFA-Arbeitssystem¹⁴⁶

3.2.2 Struktur und Bestimmung von Zeitwerten

Zur strukturierten Erfassung der Zeiten während eines Arbeitsablaufs ist im Baubetrieb die Systematik der Ablaufarten nach REFA üblich. Die Ablaufarten können in Zeitarten überführt werden, die zur Bestimmung der Auftragsdauer dienen. Wie in Abbildung 18 dargestellt, setzt sich die Auftragsdauer aus der Ausführungs- und Rüstzeit zusammen. Die Ausführungszeit wird bestimmt, indem die Zeit je Einheit mit der auszuführenden Menge in der entsprechenden Einheit multipliziert wird. Sie lässt sich in Grund-, Erhol- und Verteilzeit gliedern.

Bei der Grundzeit werden die Ablaufarten Haupt- und Nebentätigkeiten sowie ablaufbedingtes Unterbrechen unterschieden, die als Tätigkeits- und Wartezeiten einfließen. Zusätzliche Tätigkeiten und störungsbedingte Unterbrechungen werden als sachliche Verteilzeit berücksichtigt. Das persönlich bedingte Unterbrechen gilt als persönlich bedingte Verteilzeit. Die Erholzeit ist die zur Erholung benötigte Zeit.

¹⁴⁶ Vgl. ebenda, S. 70

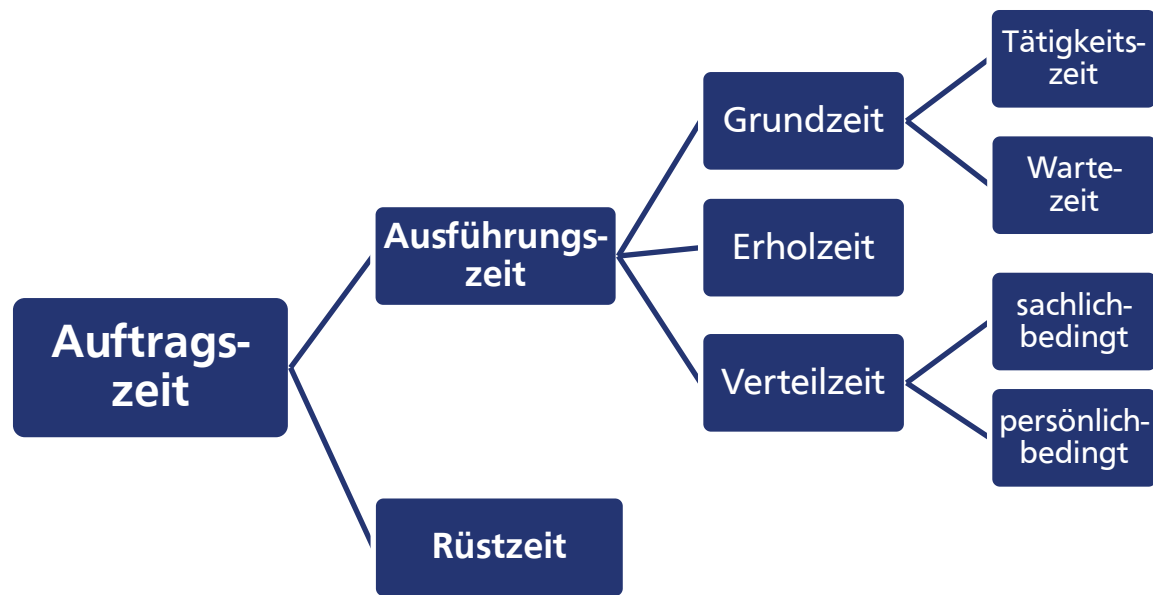


Abbildung 18: Gliederung der Auftragszeit nach REFA¹⁴⁷

Zur Ermittlung der Ist-Zeiten bei Bauabläufen existieren mehrere Möglichkeiten. Hier soll kurz auf die Stundennachkalkulation und die systematische Multimomentaufnahme eingegangen werden. Bei der Stundennachkalkulation werden die gearbeiteten Stunden den geleisteten Mengen gegenübergestellt. Damit lässt sich relativ einfach der Quotient der dokumentierten Stunden und Mengen ermitteln. Allerdings sind die Ergebnisse aufgrund von Ungenauigkeiten bei der Dokumentation und der oft nicht mehr nachvollziehbaren Randbedingungen nur eingeschränkt auf andere Projekte übertragbar.¹⁴⁸ Die systematische Multimomentaufnahme wird im Bauwesen zur Gewinnung von Zeitdaten für eine Kolonne eingesetzt. Es handelt sich um ein Zählverfahren, bei dem durch Beobachtungen in regelmäßigen Intervallen bestimmt wird, welchen Anteil die verschiedenen Teilvorgänge an der Gesamtdauer haben.¹⁴⁹

Bei der Bestimmung von Zeitwerten sind nicht nur die Zeiten zu erfassen, sondern auch die Einflussgrößen und Arbeitsbedingungen zu dokumentieren und Bezugsmengen detailliert zu bestimmen.¹⁵⁰ Außerdem ist der Leistungsgrad des Arbeitenden anzugeben, um die Unterschiede im Leistungsangebot von Arbeitskräften zu erfassen. Als Bezugspunkt hierfür wird die Normalleistung nach REFA defi-

¹⁴⁷ In Anlehnung an: Künstner (1984): REFA in der Baupraxis – Teil 2: Datenermittlung, S. 32

¹⁴⁸ Vgl. Künstner (1984): REFA in der Baupraxis – Teil 2: Datenermittlung, S. 105 ff.

¹⁴⁹ Vgl. Künstner (1984): REFA in der Baupraxis – Teil 2: Datenermittlung, S. 87 ff.

¹⁵⁰ Vgl. REFA (1978b): Methodenlehre des Arbeitsstudiums – Teil 2: Datenermittlung, S. 10

niert.¹⁵¹ Die Soll-Werte für den Aufwandswert einer Tätigkeit ergeben sich aus den Ist-Werten, indem man diese auf die Normalleistung bezieht.¹⁵²

3.3 Einflüsse der Ergonomie auf Terminpläne des Baubetriebs

Die Leistung der Arbeitskräfte respektive die erforderliche Dauer zur Ausführung von Leistungserstellungsprozessen auf Baustellen hängt von einer Vielzahl von Einflüssen ab. Dies sind unter anderem das Bauverfahren, die Baustellenorganisation sowie das individuelle Leistungsangebot der Arbeitskräfte und Baugeräte unter Einbeziehung des Arbeitsumfelds.¹⁵³ Für die Aufstellung genauer Terminpläne benötigt man im Baubetrieb daher Werkzeuge, die in der Lage sind, die Gesamtheit der Einflüsse auf die Bauprozesse abzubilden und die Dauern der einzelnen Tätigkeiten präzise vorherzusagen. Als Basis hierfür können die nachfolgend dargestellten ergonomischen Modelle der Arbeitswissenschaften dienen. Dabei ist zu beachten, dass das eigentliche Ziel der Ergonomie die Ableitung von Regeln zur Gestaltung von Arbeitsbedingungen ist.¹⁵⁴

3.3.1 Das Belastungs-Beanspruchungsmodell

Das Belastungs-Beanspruchungsmodell dient in der Ergonomie dazu, die Beanspruchung der einzelnen Arbeitskräfte infolge der Belastungen aus der Arbeitsaufgabe und den Arbeitsbedingungen unter Berücksichtigung der individuellen Eigenschaften jeder Arbeitskraft abzubilden. Das hier vorgestellte vereinfachte Belastungs-Beanspruchungsmodell nach Rohmert beschreibt diese Ursache-Wirkungsbeziehung mit Hilfe einer begrifflichen Analogie zur Technischen Mechanik.¹⁵⁵ Eine Belastung ist demnach die Ursache für eine Beanspruchung, die für jeden Menschen entsprechend seinen individuellen Eigenschaften unterschiedlich hoch ist. Zur Beschreibung des integrierten Belastungs-

¹⁵¹ Vgl. Künstner (1984): REFA in der Baupraxis – Teil 2: Datenermittlung, S. 37 ff.

¹⁵² Vgl. ebenda, S. 41

¹⁵³ Vgl. Bauer (2007): Baubetrieb, S. 547 ff.

¹⁵⁴ Vgl. Laurig (1992): Grundzüge der Ergonomie, S. 10

¹⁵⁵ Vgl. Schlick et al (2010): Arbeitswissenschaft, S. 38 ff.

Beanspruchungsmodells, das handlungstheoretische Ansätze der Soziologie aufnimmt, wird auf die Fachliteratur verwiesen.¹⁵⁶

Um mit dem Belastungs-Beanspruchungsmodell unterschiedliche Phänomene und deren Auswirkungen analysieren zu können, wird, wie in Abbildung 19 dargestellt, zwischen Teilbelastungen und Teilbeanspruchungen unterschieden. Außerdem werden die Teilbelastungen nach ihrer Höhe, Dauer und Zusammensetzung charakterisiert sowie die individuellen Eigenschaften, Fähigkeiten, Fertigkeiten und Bedürfnisse der Arbeitskräfte differenziert.¹⁵⁷



Abbildung 19: Belastungs-Beanspruchungsmodell¹⁵⁸

Die Teilbelastungen entstammen der Arbeitsaufgabe und der Arbeitsumgebung. Die Teilbelastungen aus der Arbeitsaufgabe und die damit einhergehenden Teilbeanspruchungen ergeben sich aus der Art der Arbeit und sind energetisch respektive informatorisch. Arbeit kann dabei mechanisch, motorisch, reaktiv, kombinatив oder kreativ sein und beansprucht jeweils unterschiedliche Organe und Funktionen des Menschen. Aus der Arbeitsumgebung wird der Mensch durch physikalische und chemische Einflüsse sowie sein soziales Umfeld belastet. Die Höhe der Gesamtbelastung einer Arbeitskraft ergibt sich durch Superposition der einzelnen Teilbelastungen.^{159 160}

Die Unterschiede in der Beanspruchung und Leistung von arbeitenden Menschen ergeben sich daraus, dass jeder Mensch eine individuelle Konstitution, Disposition, Qualifikation, Kompetenz und Anpassung bezüglich einer Arbeit besitzt. Neben

¹⁵⁶ Vgl. Rohmert (1984): Das Belastungs-Beanspruchungs-Konzept

¹⁵⁷ Vgl. ebenda

¹⁵⁸ Nach: ebenda, S. 196

¹⁵⁹ Vgl. Laurig (1992): Grundzüge der Ergonomie, S. 24 ff.

¹⁶⁰ Vgl. ebenda, S. 106 ff.

diesen interindividuellen Unterschieden der Eigenschaften von Arbeitskräften unterliegen diese auch zeitlichen Veränderungen, wodurch sich intraindividuelle Eigenschaftsschwankungen ergeben.¹⁶¹ Die statistische Verteilung der Eigenschaften von Menschen lässt sich durch den Mittelwert und die Standardabweichung sowie verschiedene Quantilwerte beschreiben, wobei die ausschließliche Betrachtung des Mittelwerts meist nicht ausreicht.¹⁶²

3.3.2 Ermüdung und Erholung von Arbeitskräften

Bei der Ausführung einer Arbeitsaufgabe ist der Mensch Belastungen ausgesetzt und nimmt seine Ressourcen in Anspruch. Werden für die Ausführung der Arbeit weniger Ressourcen benötigt als sich nachbilden, so entsteht ein Gleichgewicht und der Mensch kann die Arbeit dauerhaft ohne Leistungsabnahme ausführen. Überschreitet die Belastung des Menschen seine Dauerleistungsgrenze, so ermüdet er, und seine Leistungsfähigkeit nimmt infolge der Ermüdung ab. Da die Ermüdung beim Menschen ein reversibler Vorgang ist, kann sie durch Erholung vollständig rückgängig gemacht werden.¹⁶³

Grundsätzlich wird zwischen der physischen und der psychischen Ermüdung einer Arbeitskraft unterschieden. Die physische Ermüdung führt zu einer Veränderung des physiologisch-chemischen Gleichgewichts und wird durch energetische Arbeiten und körperlich belastende Umgebungseinflüsse hervorgerufen. Die psychische Ermüdung verändert dagegen die informationsverarbeitenden Funktionen und wird in erster Linie durch informatorische Arbeit ausgelöst.¹⁶⁴

Die Ermüdung im Belastungs-Beanspruchungsmodell modelliert Laurig, wie in Abbildung 20 dargestellt, analog zu einem System aus einer Feder unter Last. Die Eigenschaften der Arbeitskraft werden als Federsteifigkeit verstanden und verschlechtern sich infolge der Ermüdung. Dadurch kommt es bei konstanter Belastung zu einer größeren Verschiebung, die als Beanspruchung definiert wird. Als Folge der höheren Beanspruchung nimmt in diesem Modell auch die Leistung ab.¹⁶⁵

¹⁶¹ Vgl. Schlick et al (2010): Arbeitswissenschaft, S. 87 ff.

¹⁶² Vgl. Laurig (1992): Grundzüge der Ergonomie, S. 47 ff.

¹⁶³ Vgl. Schlick et al (2010): Arbeitswissenschaft, S. 194 f.

¹⁶⁴ Vgl. ebenda, S. 196 f.

¹⁶⁵ Vgl. Laurig (1992): Grundzüge der Ergonomie, S. 93 ff.

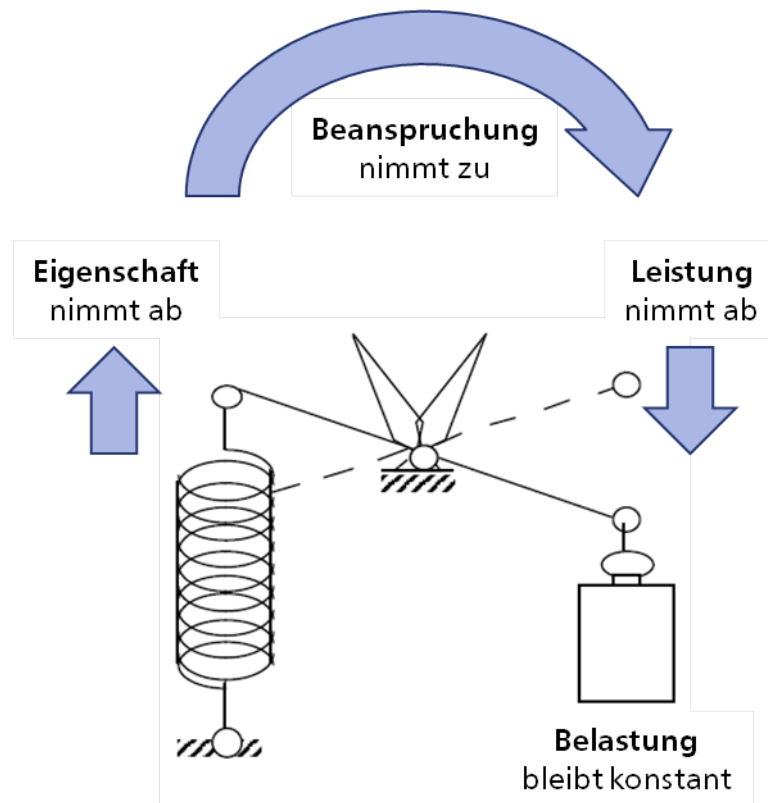


Abbildung 20: Mechanisches Ersatzmodell des Belastungs-Beanspruchungsmodells¹⁶⁶

Nach REFA führt die Ermüdung einer Arbeitskraft infolge Arbeitsbelastung zu einem Verlust an Leistungsfähigkeit¹⁶⁷ und ist zugleich der Ausgangspunkt zur Berechnung der erforderlichen Erholzeit. Dazu werden die Beanspruchungen des Menschen als Funktion aus seiner Arbeitsbelastung und Leistungsfähigkeit bestimmt und daraus die Erholzeit abgeleitet. Die Erholzeit wird dann als Zuschlag auf die Grundzeit angegeben.¹⁶⁸

3.3.3 Ergonomische Aspekte des Leistungsangebots von Arbeitskräften

Der erforderliche Zeitraum zur Erledigung einer Arbeitsaufgabe hängt unter anderem von der Anzahl und dem Leistungsangebot der Arbeitskräfte ab. Das Leis-

¹⁶⁶ nach: Schlick et al (2010): Arbeitswissenschaft, S. 39

¹⁶⁷ Vgl. REFA (1978a): Methodenlehre des Arbeitsstudiums – Teil 1: Grundlagen, S. 102

¹⁶⁸ Vgl. REFA (1978b): Methodenlehre des Arbeitsstudiums – Teil 2: Datenermittlung, S. 310 ff.

tungsangebot eines Menschen besitzt in der Ergonomie mehrere Dimensionen, ist bei jedem Menschen individuell und unterliegt zeitlichen Schwankungen. Zum einen ist die Leistungsfähigkeit einer Arbeitskraft von Bedeutung, da sie die grundsätzliche Kapazität eines Menschen zur Leistungserbringung aufgrund seiner physischen und psychischen Eigenschaften beschreibt. Die Leistungsfähigkeit steht im direkten Zusammenhang mit der Eignung eines Menschen für eine bestimmte Aufgabe. Zum anderen bestimmt die physiologische und psychologische Leistungsbereitschaft des arbeitenden Menschen, inwiefern er bereit ist, seine Potentiale respektive seine Leistungsfähigkeit auszuschöpfen.¹⁶⁹

Im Folgenden werden die Modelle zum Leistungsangebot von Menschen auf Basis des Belastungs-Beanspruchungsmodells und in der REFA-Methodenlehre vorgestellt. Beide Sichtweisen dienen im Rahmen dieser Arbeit als Grundlage für die baubetriebliche Modellierung der Leistung einzelner Arbeitskräfte innerhalb der agentenbasierten Bauablaufsimulation.

Nach Laurig führt die Veränderung der Eigenschaften eines Menschen im Sinne des Belastungs-Beanspruchungsmodells zu einer Veränderung der zu erwartenden Leistung eines Menschen. Die Eigenschaften eines Menschen kann man dabei als dessen Leistungsangebot ansehen. Die Belastung entspricht den Anforderungen der Arbeitsaufgabe an die Arbeitskraft. Die Zusammenhänge zwischen Eigenschaften, Belastungen, Beanspruchungen und der Leistung eines Menschen sind in Abbildung 20 dargestellt.

Nach REFA unterscheidet man drei Grundlagen für das Leistungsangebot eines Menschen. Die Fähigkeiten des arbeitenden Menschen setzen sich aus seinen Anlagen und seiner Qualifikation in Form von Ausbildung, Übung und Einarbeitung zusammen. Die Tatsache, dass die Fähigkeiten des Menschen nicht jederzeit voll abgerufen werden können, wird durch die Disposition berücksichtigt. Da der Mensch zudem nicht immer bereit ist, sein verfügbares Leistungsangebot voll zur Verfügung zu stellen, werden darüber hinaus die Antriebe betrachtet. Um die Leistung des arbeitenden Menschen zu bestimmen, ist, wie in Abbildung 21 dargestellt, sein Leistungsangebot den Anforderungen aus der Arbeitsaufgabe gegenüberzustellen.¹⁷⁰

¹⁶⁹ Vgl. Schlick et al (2010): Arbeitswissenschaft, S. 87 f.

¹⁷⁰ Vgl. REFA (1978a): Methodenlehre des Arbeitsstudiums – Teil 1: Grundlagen, S. 97 ff.

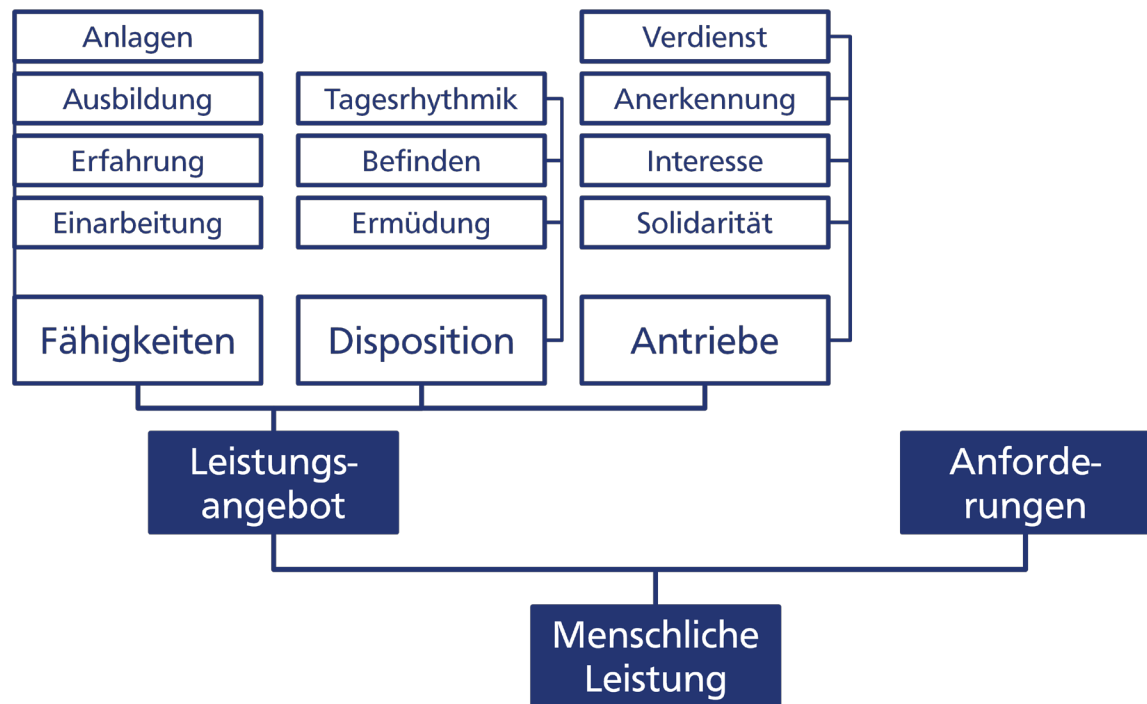


Abbildung 21: Leistungsangebot und menschliche Leistung nach REFA¹⁷¹

Bei der Erfassung von Zeitwerten wird nach REFA der Leistungsgrad bestimmt, um die Streuung des Leistungsangebots der Arbeitskräfte zu berücksichtigen. Der Leistungsgrad ist definiert als das Verhältnis der beobachteten Leistung zur Bezugsleistung. Diese Bezugsleistung ist die REFA-Normalleistung, die durch eine übliche Wirksamkeit und dauerhaft leistbare Intensität der Tätigkeitsausführung definiert ist.¹⁷² Dabei ist allerdings die unumgängliche Subjektivität der Einschätzung des Leistungsgrads durch den Beobachter zu berücksichtigen.

3.3.4 Modellierung der menschlichen Leistung im Baubetrieb

Die Tatsache, dass die Leistungsbereitschaft von Arbeitskräften von der Arbeitsumwelt und dem Menschen selbst abhängt, wird auch in der baubetrieblichen Forschung behandelt. Von besonderer Bedeutung sind die Veränderung der Dauer zur Ausführung von Arbeitsaufgaben und die damit verbundenen Auswirkungen auf die Termin- und Ressourcenplanung sowie die entstehenden Kosten. Das Ziel einiger baubetrieblicher Ansätze ist die Quantifizierung der Auswirkungen äußerer Einflüsse auf die Leistung von Arbeitskräften auf Baustellen. Andere For-

¹⁷¹ Nach REFA (1978a): Methodenlehre des Arbeitsstudiums – Teil 1: Grundlagen, S. 98

¹⁷² Vgl. REFA (1978b): Methodenlehre des Arbeitsstudiums – Teil 2: Datenermittlung, S. 128 ff.

schungsbeiträge beurteilen bestimmte Tätigkeiten hinsichtlich der ergonomischen Belastung der Arbeitskräfte.

Nachfolgend wird ein Überblick zu baubetrieblichen Forschungsbeiträgen zum Leistungsangebot und der Belastung von Arbeitskräften unter Berücksichtigung unterschiedlicher Einflussfaktoren gegeben:

- Lang stellt Werte zur Berechnung der Minderleistungen aus äußeren Einflüssen im Hinblick auf Bauzeitverzögerungen systematisch zusammen und unterscheidet dabei folgende Einflüsse:
 - Witterungseinflüsse,
 - Verlust der Einarbeitung,
 - Umsetzen des Arbeitsplatzes,
 - ungünstige Veränderung von Abschnittsgrößen,
 - veränderte Kolonnenzusammensetzung,
 - diskontinuierlicher Arbeitsfluss sowie
 - Stilllegung und Wiederaufnahme der Arbeiten.¹⁷³
- Fetzner untersucht die Auswirkungen von Witterungseinflüssen auf unterschiedliche Tätigkeiten im Rohbau mit REFA-Aufnahmen und quantifiziert unter anderem den Einfluss der Temperatur auf Beton- und Mauerarbeiten. Hierzu wurden bei REFA-Aufnahmen die Aufwandswerte ermittelt und zugehörige Temperaturwerte gemessen, um den Einfluss der Temperatur auf den Aufwandswert zu bestimmen.¹⁷⁴
- Haide entwickelt eine ganzheitliche Methode zur Bestimmung der Vorgangsdauer lohnintensiver Arbeiten, die auf Gleichungen zur Berechnung der Einflussfaktoren und Dauern basiert. Beispielhaft werden dazu die Eingangswerte anhand von Pflasterarbeiten bestimmt.¹⁷⁵
- Motzko zeigt, wie man die Belastung und Beanspruchung des arbeitenden Menschen bestimmen kann und führt damit ergonomische Methoden in die baubetriebliche Forschung ein. Hierzu nutzt er physiologische Verfahren für Messungen am arbeitenden Menschen und verwendet das rechnergestützte Menschmodell *HEINER*, um Belastung nachzubilden.¹⁷⁶

¹⁷³ Vgl. Lang (1987): Ein Verfahren zur Bewertung von Bauablaufstörungen [...], S. 50 ff.

¹⁷⁴ Vgl. Fetzner (2007): Ein Verfahren zur Erfassung von Minderleistungen aufgrund witterungsbedingter Bauablaufstörungen, S. 157 ff.

¹⁷⁵ Vgl. Haide (2007): [...] Quantifizierung der Einflüsse auf Vorgangsdauern [...], S. 29 ff.

¹⁷⁶ Vgl. Motzko (1990): Ein Verfahren zur ganzheitlichen Erfassung und rechnergestützten Einsatzplanung moderner Schalungssysteme, S. 63 ff.

- Weitere wissenschaftliche Studien zur Beanspruchung von Arbeitskräften in der Bauindustrie entstanden unter anderem aus der Zusammenarbeit der Institute für Baubetrieb und Arbeitswissenschaft der TU Darmstadt. Der Fokus lag auf der Analyse und Bewertung der Belastungen und Beanspruchungen in bestimmten Arbeitssituationen mit dem Ziel, Geräte respektive Arbeitsgegenstände ergonomisch günstiger zu gestalten.^{177 178}
- Schlagbauer untersucht die Zusammenhänge zwischen der Leistung von Bauarbeitskräften und ihrer Belastung bzw. Beanspruchung.¹⁷⁹

Der Ansatz von Motzko, ergonomische Erkenntnisse in die baubetriebliche Arbeitsvorbereitung einzubeziehen, soll hier erweitert werden und dazu dienen, die Leistungsveränderung von Arbeitskräften auf Basis ihrer ergonomischen Eigenschaften und Belastungen zu erklären. Mit der agentenbasierten Simulation des Bauablaufs ist dies heute möglich, da Menschen individuell modelliert werden und ein dynamisches System aus Individuen und deren Umwelt erzeugt wird. Dazu werden ergonomische Teilbelastungen, die beispielsweise mit ergonomischen Menschmodellen bestimmt werden können, als Eingangswerte verwendet.

3.4 Kritik an den ergonomischen Modellen aus Sicht der Bauablaufmodellierung

Der Baubetrieb verfolgt mit der Nutzung der Erkenntnisse aus den Arbeitswissenschaften, insbesondere der Ergonomie, das Ziel die Leistung von Arbeitskräften möglichst präzise zu prognostizieren. Die untersuchten arbeitswissenschaftlichen Modelle sind hierfür nicht ausgelegt, sondern beschreiben deskriptiv die beobachtbaren Abläufe, Leistungen oder Belastungen der Arbeitskräfte. Diese Beobachtungen können verwendet werden, um die analysierten Arbeitssysteme zu optimieren und Arbeitsplätze ergonomischer zu gestalten, sind aber nicht für die Modellierung der Leistungsfähigkeit im Sinne eines Simulationsmodells für den Bauablauf geeignet. Die baubetrieblichen Ansätze legen ihren Fokus dagegen oft auf die Auswirkungen äußerer Einflüsse oder betrachten einzelne Aspekte der Ergonomie im Hinblick auf die Leistungsfähigkeit der Arbeitskräfte. Daher wird in

¹⁷⁷ Vgl. Rohmert, Wakula (1996): Gestaltung beanspruchungsgerechter Arbeitsmittel und Arbeitsobjekte in der Bauwirtschaft

¹⁷⁸ Vgl. Landau (1984): Zur Belastung [...]und Arbeitsgestaltung großformatiger Kalksandsteine

¹⁷⁹ Vgl. Schlagbauer (2010): Arbeitsbelastung und Arbeitsleistungskurven

Kapitel 4.3 ein eigenes baubetriebliches Modell auf Basis der Arbeitswissenschaften formuliert, das als Leistungs-Ermüdungsmodell bezeichnet werden kann.

Hierzu ist eine Kombination des Arbeitssystems und Leistungsangebots nach REFA mit dem Belastungs-Beanspruchungsmodell von Rohmert zu entwickeln, um die durchschnittliche Normalleistung mit einem Faktor für die Leistungsfähigkeit zu ergänzen und um die Erholzeit zu erweitern. Das REFA-Arbeitssystem liefert eine zweckmäßige systemtheoretische Beschreibung der Bauprozesse. Das Belastungs-Beanspruchungsmodell bildet die ergonomische Komponente zur Formulierung von Belastungen und deren individuelle Auswirkungen auf die Arbeitskraft ab.

Die dargelegte Kombination verschiedener arbeitswissenschaftlicher Konzepte sowie deren Modellierung für den Baubetrieb erfordern bestimmte Anpassungen. Denn die Modelle sind untereinander nicht vollständig kompatibel. Außerdem wurden die arbeitswissenschaftlichen Modelle ursprünglich nicht für die Leistungsprognose formuliert. Zudem sind die ursprünglichen Modelle in Teilen nicht für die rechnergestützte Modellierung und Simulation geeignet. Die Abweichungen von den arbeitswissenschaftlichen Grundmodellen werden im Abschnitt 4.3.4 dargestellt und begründet.

Kapitel 4

Vorgehensweise zur Modellierung des Bauablaufs mit Agenten und Ontologien

4.1 Agentenbasierte Modellierung für die Bauindustrie

Der Einsatz moderner Simulationstechniken, wie die Multiagentensimulation, in der Bauindustrie ist, wie bereits in der Zielsetzung dieser Arbeit dargelegt wurde, nur durch die Bereitstellung leistungsfähiger, effizienter und nutzerfreundlicher Werkzeuge durch Software-Anbieter möglich. Welche Anforderungen im Einzelnen von Seiten der Bauindustrie bestehen und weshalb existierende Vorgehensmodelle für deren Erfüllung nicht geeignet sind, wird im Folgenden dargelegt. Anschließend wird ein Vorgehensmodell für den Baubetrieb zunächst allgemein und anschließend im Detail beschrieben. Dieses Vorgehen dient der Generierung eines Simulationsmodells, das die Anforderungen der Bauindustrie erfüllt, den Bauablauf über Agentenverhalten modelliert und der Formulierung einer kompatiblen Ontologie zum Informationsaustausch.

4.1.1 Analyse bestehender Vorgehensmodelle hinsichtlich eines Einsatzes in der Bauindustrie

In der Baupraxis erscheint die aufwändige Modellierung des Bauablaufs mit den heute verfügbaren Werkzeugen und Vorgehensweisen regelmäßig als nicht rentabel.¹⁸⁰ Außerdem stehen die ausführenden Unternehmen bei der Termin- und

¹⁸⁰ Vgl. Kugler, Franz (2007): Entwurf eines multiagentenbasierten Referenzmodells für Simulationen im Hochbau, S. 70

Ressourcenplanung immer wieder vor dem Problem der Verfügbarkeit und Kompatibilität wichtiger Eingangsdaten. Daher benötigt die Bauindustrie Software-Werkzeuge zur Termin- und Ressourcenplanung, die schnell und effizient einsetzbar sind und die von Domänenexperten ohne Programmierkenntnisse genutzt werden können.

In Experteninterviews¹⁸¹ wurden vor allem folgende Punkte als wichtig angesehen:

- Nutzbarkeit durch alle Beteiligten,
- kurze Simulationszeiten,
- schnelle Eingabemöglichkeiten und
- die Möglichkeit, Daten Dritter zu integrieren.

Die gängigen Vorgehensmodelle für die Simulation im Allgemeinen und die Multiagentensimulation im Speziellen gehen davon aus, dass eine Person oder ein Team alle Schritte der Simulation ausführt. Das vorrangige Ziel vieler Vorgehensmodelle zur Simulation ist die Sicherung bzw. Steigerung der Qualität des Simulationsergebnisses durch ein strukturiertes Vorgehen und die Integration qualitätssichernder Techniken.^{182 183} Beispielhaft soll das in Abschnitt 2.1.3.2 vorgestellte Vorgehensmodell für die Multiagentensimulation nach Oechslein diskutiert werden. Es setzt sich wie in Abbildung 11 dargestellt aus fünf Phasen zusammen.¹⁸⁴ Besonders hilfreich ist dieses Modell, wenn die Simulationssoftware SeSAM verwendet wird, da es mit SeSAM-UML und SeSAM-IMPL zwei Werkzeuge zur Verfügung stellt, die in das Vorgehensmodell integriert sind.

Dennoch ist die Vorgehensweise nach Oechslein nur eingeschränkt auf die Bauindustrie übertragbar, da sie eine intensive Beschäftigung mit der Simulationsumgebung SeSAM erfordert und einen beträchtlichen Modellierungsaufwand mit sich bringt. Auch würde die individuelle Modellierung einer Baustelle nicht die gewünschten Effekte der Wiederverwendbarkeit der Elemente des Modells ermöglichen.

Aus diesen Forderungen und Randbedingungen wurde für diese Arbeit der in Abbildung 1 dargestellte Grundgedanke der Trennung von Modellbildung und Simulationdurchführung formuliert. Damit soll vermieden werden, dass aufwändige

¹⁸¹ Vgl. Scholz, B.: Praxisanforderungen an Simulationswerkzeuge im Baubetrieb. 2009, S.72 f.

¹⁸² Vgl. Oechslein, C.: Vorgehensmodell [...] für Multiagentensimulationen. 2004, S. 10

¹⁸³ Vgl. Rabe, M. et al: Verifikation und Validierung für die Simulation [...]. 2008, S. 4 ff.

¹⁸⁴ Vgl. Oechslein, C.: Vorgehensmodell [...] für Multiagentensimulationen. 2004, S. 51 ff.

Modellierungsaufgaben während der Arbeitsvorbereitung durchzuführen sind. In diesem Kapitel wird dargestellt, wie die Modellierung durch Simulationsexperten erfolgt. Kapitel 5 beschreibt darauf aufbauend die Durchführung und Ausführung der Simulationsexperimente durch Baubetriebsexperten.

4.1.2 Modellierungsschritte und ihre Zusammenhänge

Zur agentenbasierten Modellierung des Bauablaufs wurde ein zweistufiges Vorgehensmodell entwickelt. Dessen erste Stufe stellt einen Leitfaden für Simulationsexperten dar, die den Bauablauf für baubetriebliche Zwecke unter Berücksichtigung ergonomischer Erkenntnisse modellieren. Sie beinhaltet, wie in Abbildung 22 dargestellt, drei Schritte zur Erstellung des Simulationsmodells sowie die Entwicklung einer Ontologie. Als Ergebnis entsteht ein lauffähiges Multiagentenmodell der Bauabläufe, das die Ergonomie der Arbeitskräfte nachbildet und dessen Übereinstimmung mit bestehenden Erkenntnissen überprüft wurde. Zudem wird die TBox einer Ontologie mit entsprechenden Konzepten formuliert.

Den Startpunkt der ersten Stufe des Vorgehensmodells bildet die arbeitswissenschaftliche Modellierung, welche zeitliche Betrachtungen nach REFA und ergonomische Einflüsse auf die Leistung der Arbeitskräfte umfasst und damit das Multiagentenmodell mit erprobten baubetrieblichen Techniken verknüpft. Darauf aufbauend wird ein agentenbasiertes Modell implementiert und nachfolgend verifiziert, validiert und justiert. Seine Eigenschaften werden am Ende dieses Kapitels zusammengefasst. Parallel zur Modellierung des Bauablaufs wird die Struktur einer Ontologie entwickelt, die die Basisdaten und Ergebnisse der Simulationsexperimente abbilden kann.

Das erzeugte lauffähige Multiagentenmodell zur ergonomiegestützten Bauablaufsimulation, dessen Konzepte in die Struktur einer Ontologie integriert wurden, wird in der zweiten Stufe des Vorgehensmodells zur Aufstellung von Situationen, Durchführung von Experimenten und Auswertung sowie Bereitstellung der Simulationsergebnisse verwendet.

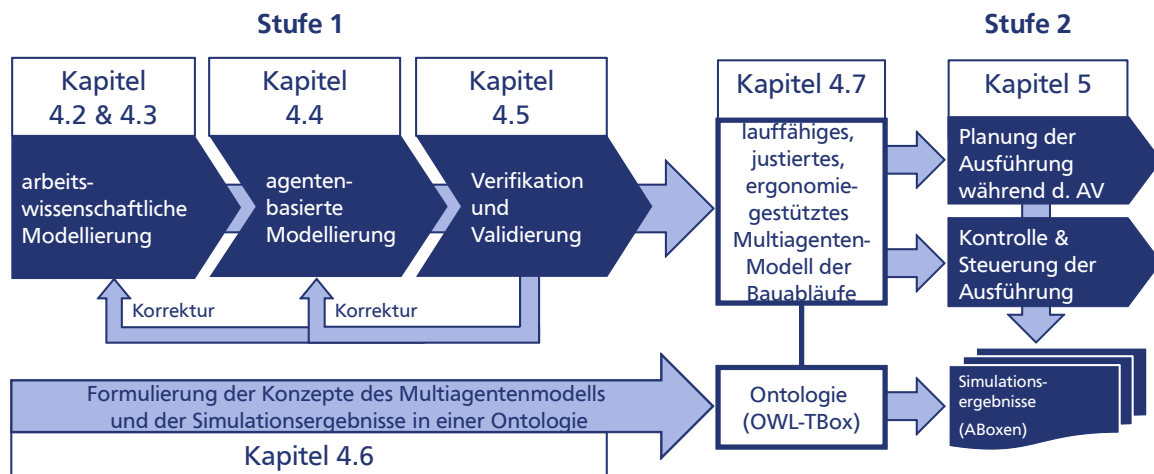


Abbildung 22: Modellierungsschritte in der ersten Stufe des Vorgehensmodells

4.2 Aufstellen eines baubetrieblichen, agentenbezogenen Arbeitssystems für Montagearbeiten

Das REFA-Arbeitssystem ist ein im Baubetrieb etabliertes Modell zur Beschreibung von Bauprozessen und kann als Basis zur Modellierung der Elemente und des Verhaltens eines Multiagentensystems genutzt werden. Daher ist das Arbeitssystem eine optimale Basis, um die agentenbasierte Bauablaufsimulation mit bekannten Methoden des Baubetriebs zu verknüpfen.

4.2.1 Aufstellen eines Arbeitssystems der Montage und Logistik

Das Aufstellen eines Arbeitssystems für Montage und Logistik auf einer Baustelle orientiert sich an dem in Abschnitt 3.2.1 beschriebenen Vorgehen nach REFA. Das Arbeitssystem soll insbesondere die für die agentenorientierte Bauablaufsimulation von Montagearbeiten notwendigen Informationen bereitstellen.

Ein Arbeitssystem umfasst hierzu die Montage- und Logistiktätigkeiten, um ein Bauteil vom Transportfahrzeug oder Lagerplatz an den Bestimmungsort im oder am Gebäude zu transportieren und dort zu montieren. Der Zweck des Arbeitssystems respektive Bauprozesses ist es, ein auf die Baustelle geliefertes Fertigteil an der vorgesehenen Stelle zu montieren. Zur Abbildung des Gesamtablaufs oder einzelner Teilabläufe einer Baumaßnahme sind mehrere gleich- oder verschiedenartige Arbeitssysteme zu kombinieren.

Die Elemente des Arbeitssystems ergeben sich bei der Beschreibung von Prozessen zum Transport und der Montage von Fertigteilen regelmäßig, wie in nachfolgen-

der Abbildung 23 dargestellt. Für die agentenbasierte Modellierung sind dabei insbesondere Mensch und Betriebsmittel, also Monteur und Transportgerät mit Baugeräteführer, sowie deren Arbeitsablauf, also die Abfolge von Tätigkeiten der Montage und des Transportes, von Bedeutung. Aber auch die Bereitstellung der Eingaben sowie Umwelteinflüsse können und sollen modelliert werden und sind daher von Interesse. Und die Arbeitsaufgabe sowie die geforderte Ausgabe sind wichtig, um die Modellierung zu überprüfen und ggf. Verknüpfungen mit anderen Arbeitssystemen respektive Prozessen modellieren zu können.

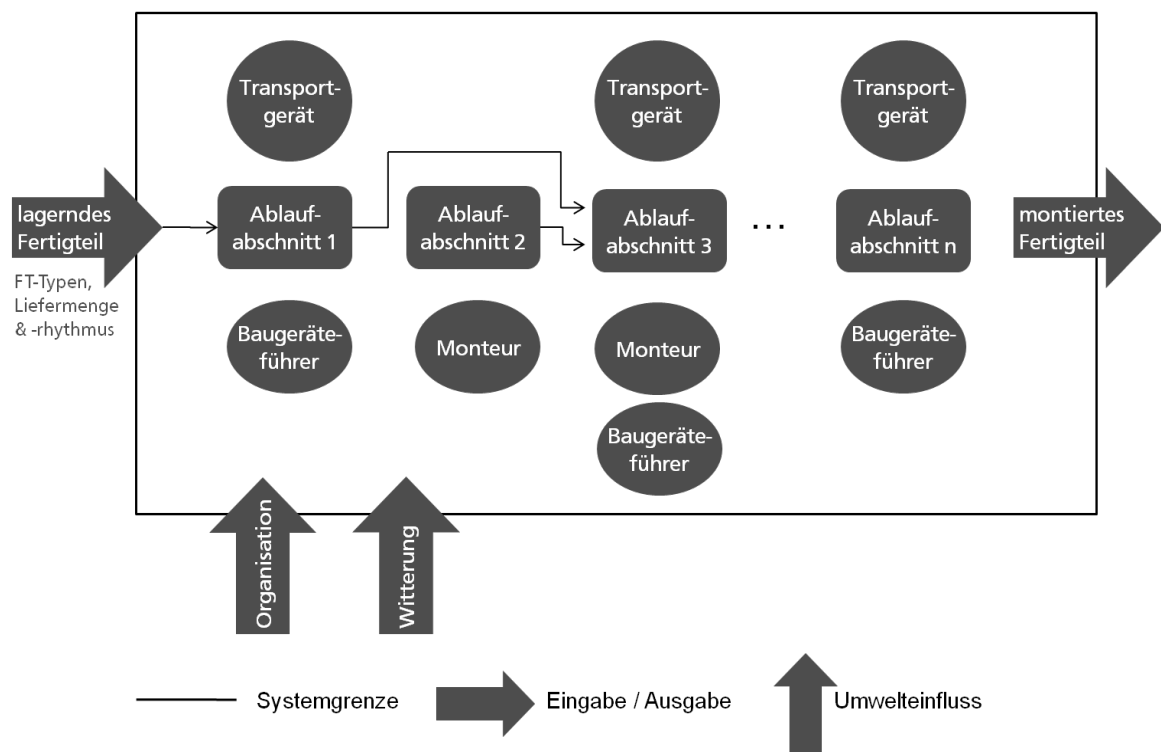


Abbildung 23: Arbeitssystem der Montage und Baustellenlogistik zur agentenbasierten Modellierung

Der Detaillierungsgrad bei den Eingaben und Betriebsmitteln des Arbeitssystems kann entsprechend der Erfordernisse angepasst werden. Das Arbeitssystem beschreibt meist die Fertigteile selbst als Eingabe, wobei hier auch die unterschiedlichen Fertigteiltypen identifiziert werden und der Rhythmus und die jeweilige Menge der Lieferungen zu beschreiben sind. Bei den Betriebsmitteln werden Baugeräte mit Geräteführer sowie ggf. wechselnde Anbaugeräte und erforderliche Arbeitsplätze erfasst. Für eine detailliertere Analyse wäre es beispielsweise auch möglich, persönliches Werkzeug oder Kleinteile zu betrachten.

Der Arbeitsablauf ist dagegen detailliert zu ermitteln, da später aus ihm das Verhalten der Agenten abgeleitet wird. Hierzu ist es erforderlich, die Arbeitsabläufe auf der Ebene der Vorgangsstufen zu erfassen und die entsprechenden Grundzei-

ten zu bestimmen. Zudem sind jeder Vorgangsstufe die erforderlichen Arbeitskräfte und Betriebsmittel sowie technologische Voraussetzungen zuzuordnen. Damit werden im Arbeitsablauf alle Informationen erfasst, die man in einem sehr detaillierten Netzplan mit einem Knoten je Vorgangsstufe und den dazugehörigen technologischen und kapazitiven Anordnungsbeziehungen abbilden könnte. Darüber hinaus ist es erforderlich, die Kooperation der Arbeitskräfte untereinander zu erfassen, denn die Multiagentensimulation ermöglicht es, diese zu modellieren, wodurch wesentlich differenziertere Bauablaufmodelle möglich sind.

Die Informationen, um ein Arbeitssystem wie oben beschrieben aufzustellen zu können, werden mit den Techniken der Datenermittlung nach REFA gewonnen. Die Elemente des Arbeitssystems werden durch Beobachtung und Analyse der Bauausführung vor Ort oder aus Anweisungen und Plänen zum Ablauf von Montage und Logistik generiert. Die Grundzeiten der Teilvorgänge oder Vorgangsstufen können für existierende Systeme anhand realer Arbeitssysteme ermittelt werden oder sind bei neuartigen Systemen basierend auf Werten für vergleichbare Tätigkeiten abzuleiten und später mit realen Werten zu justieren. Bei allen Verfahren zur Datenermittlung bei Arbeiten, die durch Kolonnen ausgeführt werden, besteht allerdings das Problem, dass keine explizite Zuweisung der Tätigkeiten zu einzelnen Arbeitskräften erfolgt, sondern vielmehr die Kolonne als Ganzes betrachtet wird. Dies erschwert die agentenbasierte Modellierung, bei der jede Tätigkeit individuell als Agentenverhalten modelliert wird.

4.2.2 Übertragung der Elemente des REFA-Arbeitssystems in ein Multiagentenmodell

Um baubetriebliche Arbeitssysteme auf Basis des Agentenkonzepts weiter zu entwickeln, ist es erforderlich die Elemente des REFA-Arbeitssystems als Bestandteile eines Multiagentenmodells abzubilden. Ein Multiagentenmodell besteht, entsprechend den Ausführungen in Abschnitt 2.1.2.2 aus autonom handelnden Agenten, passiven Objekten und einer Umwelt mit räumlicher Ausdehnung und einem zeitlichen Verlauf.

Wie in Tabelle 3 dargestellt, ist es möglich, einen Großteil der Elemente eines Arbeitssystems nach REFA in ein Multiagentenmodell zu übertragen. Als autonome, anthropomorphe und soziale Entitäten sind Agenten prädestiniert, die Menschen in einem Arbeitssystem abzubilden. Da als Betriebsmittel nur Baugeräte betrachtet werden, die von einem Baugeräteführer bedient werden, sind auch diese als Agenten zu modellieren. Das Verhalten der Agenten ergibt sich zum großen Teil aus dem Arbeitsablauf, wobei insbesondere die erforderliche Kooperation und Kommunikation der Agenten respektive Arbeitskräfte im Arbeitssystem nicht beschrie-

ben wird. Die Umwelteinflüsse auf das REFA-Arbeitssystem lassen sich direkt als Variablen der Umwelt darstellen, wobei es möglich ist, dass die Umwelt ihre Variablen im Laufe der Experimente selbstständig verändert und die Variablen Einfluss auf das Verhalten der Agenten haben. Die Fertigteile, welche die Eingaben des Arbeitssystems bilden, werden im Multiagentenmodell als Objekte betrachtet, da sie nicht selbstständig handeln, aber eigene Eigenschaften besitzen. Um die Anlieferung der Eingaben zu modellieren, wird die Umwelt genutzt, welche ähnlich den Agenten über ein autonomes Verhaltensmuster verfügt. Die Ausgabe des Arbeitssystems kann als das Resultat der Veränderung der Objekte durch die Agenten verstanden werden. Die Arbeitsaufgabe ist hingegen nicht explizit in einem Multiagentenmodell abbildbar, sondern dient nur im Rahmen des Vorgehensmodells zur Validierung und Verifikation des Multiagentenmodells.

Elemente des REFA-Arbeitssystems	Bestandteile des Multiagentenmodells
Arbeitsaufgabe	--
Eingabe	Objekte (erzeugt durch Umwelt)
Mensch	Agent
Betriebsmittel	Agent
Arbeitsablauf	Agentenverhalten
Umwelteinflüsse	Variablen der Umwelt
Ausgabe	Veränderung der Objekte durch Agenten
--	Agentenkommunikation

Tabelle 3: Übertragung des REFA-Arbeitssystems in ein Multiagentenmodell

Da das Ziel der Multiagentensimulation die präzise Vorhersage der Abläufe und Tätigkeitsdauern auf der Baustelle ist, muss ein besonderes Augenmerk auf die Modellierung der Zeitspanne aller Aktivitäten der Agenten gelegt werden. Hierzu dient ein Vergleich der Aktivitäten im Multiagentenmodell sowie der Bestandteile der Vorgabezeit nach REFA.

Multiagentenmodell	Ablauf- und Zeitarten nach REFA		
Aktivität	Ablaufart	Zeitarten	
Montage und Transport	Haupttätigkeit	Tätigkeitszeit	Grundzeit
Fahrbewegungen, Kommunikation ...	Nebentätigkeit	Tätigkeitszeit	Grundzeit
Zusatztätigkeit	Zusätzliche Tätigkeit	Sachliche Verteilzeit	Verteilzeit
Warten auf Kollegen	Ablaufbedingtes Unterbrechen	Wartezeit	Grundzeit
---	Störungsbedingtes Unterbrechen	Sachliche Verteilzeit	Verteilzeit
Pausen zur Erholung	Erholen	Erholungszeit	Erholungszeit
---	Persönlich bedingtes Unterbrechen	Persönliche Verteilzeit	Verteilzeit

Tabelle 4: Gegenüberstellung der Aktivitäten des Multiagentenmodells mit den Ablauf- und Zeitarten nach REFA

Wie man aus Tabelle 4 ablesen kann, werden alle Ablaufarten, die der Grundzeit zuzurechnen sind, im Multiagentenmodell durch Aktivitäten wiedergegeben. Entsprechende Werte aus REFA-Zeitaufnahmen sind somit für das Multiagentenmodell nutzbar. Allerdings ist hinsichtlich der Dauer der Haupttätigkeiten zu berücksichtigen, dass anstelle des Leistungsgrades nach REFA das im folgenden Abschnitt 4.3 erläuterte ergonomische Leistungsangebot die Grundzeit beeinflusst. Auch die Pausendauern der Erholungszeit entstammen dem Leistungs-Ermüdungsmodell.

Die Modellierung der Verteilzeit entspricht dagegen nicht dem REFA-Schema. Direkt umgesetzt werden im Multiagentenmodell lediglich die zusätzlichen Tätigkeiten der sachlichen Verteilzeit. Die persönliche Verteilzeit wird dagegen in die Pausenzeit integriert, zumal man davon ausgehen kann, dass jede persönlich bedingte Unterbrechung eine Erholung mit sich bringt. Das störungsbedingte Unterbrechen wird im Multiagentenmodell, verglichen mit der REFA-Methodik, wesentlich realitätsnaher abgebildet, indem äußere Einflüsse, wie ein Lieferengpass oder ein Maschinenausfall, zur Störung des Arbeitsablaufs führen.

4.3 Agentenbasiertes Leistungs-Ermüdungsmodell für Vorgabezeiten

Die Zusammenführung der arbeitswissenschaftlichen Teilgebiete der Zeitwirtschaft nach REFA und der Ergonomie mit der Simulation bietet für die Prognose des zeitlichen Ablaufs von Bauprozessen besonderes Potential. Denn während die REFA-Vorgabezeiten eine differenzierte Beschreibung und Erfassung von Zeiten eines Bauprozesses ermöglicht, bietet die Ergonomie Erklärungen zur Beanspruchung, Ermüdung und zum Leistungsangebot von Arbeitskräften an. Eine Kombination dieser beiden Sphären mit der agentenbasierten Simulation verspricht daher präzise Prognosen hinsichtlich der Leistungsfähigkeit und notwendigen Erholzeiten der Arbeitskräfte in Abhängigkeit von ihren Eigenschaften und der Belastung durch die Arbeit sowie Umwelteinflüsse.

Allerdings liegt der Fokus der Arbeitswissenschaften, wie in Kapitel 3.4 erläutert, in der Beschreibung, Analyse und nachträglichen Verbesserung von Arbeitsabläufen. Im Rahmen des baubetrieblichen Vorgehensmodells für die agentenbasierte Bauablaufsimulation wird daher ein auf die Bedürfnisse des Baubetriebs und die Erfordernisse der Multiagentensimulation abgestimmtes Modell vorgeschlagen.

Die Kombination baubetrieblicher, arbeitswissenschaftlicher und simulationstechnischer Aspekte ist zielführend, da das Potential der Ergonomie zwar in der REFA-Methodenlehre behandelt, aber wegen der komplexen Umsetzung in der baubetrieblichen Praxis zu selten angewendet wird. Hier bietet die Multiagentensimulation gute Voraussetzungen, um ein derartiges Modell umzusetzen, da im Gegensatz zu herkömmlichen Techniken der Termin- und Ressourcenplanung die Arbeitskräfte automatisch als Individuen modelliert werden und eine dynamische Umwelt mit Einfluss auf die Individuen existiert. Dies ermöglicht eine effiziente Integration der Ergonomie in die Bauablaufsimulation.

4.3.1 Modell der Leistung und Ermüdung von Arbeitskräften

Die in Kapitel 3.3 erläuterten Zusammenhänge zwischen der Ermüdung und dem Leistungsangebot sowie der Belastung, den Eigenschaften und der Beanspruchung einer Arbeitskraft können als Basis für ein Modell der Leistung und Ermüdung von Arbeitskräften dienen. Hierzu können für eine baubetriebliche Simulation der Leistungserstellungsprozesse auf einer Baustelle das Belastungs-Beanspruchungsmodell von Rohmert und die Zeitbegriffe nach REFA kombiniert werden. Als Ergebnis kann das in Abbildung 24 dargestellte Leistungs-Ermüdungsmodell formuliert werden, das arbeitswissenschaftliche Erkenntnisse

aus dem Bereich der Ergonomie für die baubetriebliche Multiagentensimulation nutzbar macht.

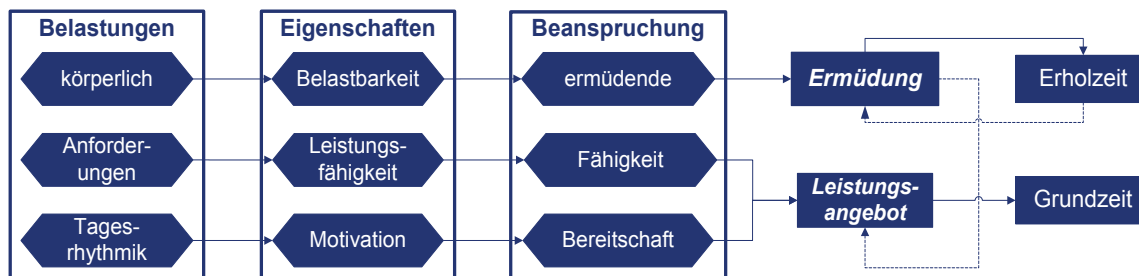


Abbildung 24: Modell der Ermüdung und des Leistungsangebots sowie deren Auswirkungen auf Grund- und Erholzeiten

Aus den Teilbelastungen einer Arbeitskraft sowie ihren Eigenschaften ergeben sich ihre individuellen Beanspruchungen. Diese führen zur Ermüdung der Arbeitskraft und bestimmen deren verfügbares Leistungsangebot. Das Leistungsangebot wird durch die Ermüdung und zwei Beanspruchungsgrößen beeinflusst.

Die Fähigkeitsbeanspruchung spiegelt wider, in welchem Umfang die Ausbildung, Einübung und Einarbeitung der Arbeitskraft die Anforderungen aus der Arbeitsaufgabe abdecken. Die Bereitschaftsbeanspruchung beschreibt das Ausmaß der Bereitschaft der Arbeitskraft, ihre Fähigkeiten voll zum Einsatz zu bringen, wobei sowohl die persönliche Motivation als auch die Tageszeit eine Rolle spielen.

Die Ermüdungsbeanspruchung hängt von der Dauer und Höhe der ermüdenden Teilbelastungen sowie der Belastbarkeit der Arbeitskraft ab. Sind die ermüdenden Teilbelastungen größer als die Dauerleistungsgrenze der Arbeitskraft, so ermüdet diese. Die Ermüdung ergibt sich als Summe der Ermüdungsbeanspruchungen einer Arbeitskraft über die Zeit. Neben dem Einfluss der Ermüdung auf das Leistungsangebot zeigt sie auch die Notwendigkeit einer Erholpause an. Während der Erholpause entfällt die Ermüdungsbeanspruchung, so dass die Ermüdung rückgängig gemacht wird und das Leistungsangebot wieder voll zur Verfügung steht. Die Reduktion des Leistungsangebots durch die Ermüdung wird durch einen justierten Ermüdungsfaktor ausgedrückt, der basierend auf der Ermüdung berechnet wird.

Das Leistungsangebot innerhalb der Simulation ist dabei vom Leistungsgrad nach REFA zu unterscheiden, auch wenn es die Dauer einer Tätigkeit in gleicher Weise beeinflusst. Denn das Leistungsangebot stellt eine Rechengröße dar, die man als theoretischen Soll-Wert ansehen kann. Der Leistungsgrad gibt dagegen die Bewertung einer Ist-Tätigkeit wieder. Zugleich erweitert das Leistungsangebot das Belastungs-Beanspruchungs-Modell nach Rohmert. Statt die Eigenschaften als verän-

derlich anzusehen, ergibt sich aus den verschiedenen Teilbeanspruchungen sowie der gesondert zu betrachtenden, da zeitlich veränderlichen, Ermüdung das Leistungsangebot einer Arbeitskraft.

Da das vorliegende Modell zur Berechnung der Auswirkungen ergonomischer Aspekte auf die Grund- und Erholzeit dienen soll, sind die Beziehungen der Elemente des Leistungs-Ermüdungsmodells mathematisch zu formulieren. Jede Beanspruchung ergibt sich aus der Differenz der ihr zugeordneten Teilbelastungen und den zugehörigen Eigenschaften.

$$\text{Ermüdungsbeanspruchung} = \sum_{i=1}^n (\text{Teilbelastungen}) - \text{Belastbarkeit}$$

$$\text{Fähigkeitsbeanspruchung} = \text{Anforderungen} - \left(\frac{\text{Qualifikation} \times \text{Einarbeitung}}{\text{Lernfortschritt}} \right)$$

$$\text{Bereitschaftsbeanspruchung} = \text{Tagesrhythmik} - \text{Motivation}$$

Formel 1: Berechnung der Beanspruchungen

Für die Ermüdung ist die Summe der Ermüdungsbeanspruchungen und Erholungswerte über die Zeit zu bilden.

$$\text{Ermüdung} = \sum_{t=0}^{\infty} \text{Ermüdungsbeanspruchungen} - \sum_{t=0}^{\infty} \text{Erholungswerte}$$

Formel 2: Berechnung der Ermüdung

Zur Einbeziehung und Justierung des Einflusses der Ermüdung auf das Leistungsangebot wurde der Ermüdungsfaktor eingeführt. Er beschreibt die Reduktion des Leistungsangebots einer Arbeitskraft infolge Ermüdung. Der Ermüdungsfaktor hat den Wert 0%, wenn keine Ermüdung vorliegt und nimmt mit zunehmender Ermüdung linear zu. Die entsprechende Formel ist unten dargestellt, wobei die Proportionalitätskonstante k im Rahmen der in Kapitel 4.5 dargestellten Justierung zu bestimmen ist.

$$\text{Ermüdungsfaktor} = k \times \text{Ermüdung}$$

Formel 3: Berechnung des Ermüdungsfaktors

Das Leistungsangebot ergibt sich als Differenz mit dem Minuend 100% und den Subtrahenden Ermüdungsfaktor, Fähigkeitsbeanspruchung und Bereitschaftsbeanspruchung.

$$\text{Leistungsangebot} = 100\% - (\text{Ermüdungsfaktor} + \text{Fähigkeitbeanspruchung} + \text{Bereitschaftsbeanspruchung})$$

Formel 4: Mathematische Formulierung des Leistungsangebots

Die Wahrscheinlichkeit für eine Pause und die Dauer dieser Erholzeit zum Abbau der Ermüdung steigen proportional zur Ermüdung an. Wichtig ist dabei die Höhe des Erholwerts, der angibt, wie schnell die Ermüdung rückgängig gemacht wird. Die beiden Faktoren lassen sich mit den Variablen p für die Pausenwahrscheinlichkeit und e für den Abbau der Ermüdung je Zeiteinheit beschreiben.

Die Auswirkung des Leistungsangebots auf die Grundzeit wird durch die folgende Gleichung über die zu justierenden Proportionalitätskonstante j ausgedrückt. Die Grundzeit einer Tätigkeit basiert auf der normierten Basis-Grundzeit, welche unter Ausblendung der ergonomischen Einflüsse zu bestimmen ist. Grundzeit ist proportional zur normierten Basis-Grundzeit und umgekehrt proportional zum Leistungsangebot, wobei für das Leistungsangebot ein Minimum von 30% festgelegt wird.

$$\text{Grundzeit} = \text{normierte BasisGrundzeit} \times \frac{j}{\text{Leistungsangebot}}$$

Formel 5: Berechnung der Grundzeit

Das baubetriebliche Leistungs-Ermüdungsmodell ist nicht vollständig mit dem in Kapitel 3.3 dargestellten Modell zur Arbeitsermüdung kompatibel. Dieses postuliert, dass die Ermüdung zu einer Verschlechterung der Gesamtheit der Eigenschaften führt, wodurch bei konstanter Belastung die Leistung ab- und die Beanspruchung zunimmt.¹⁸⁵ Eine direkte zeitliche Dimension besitzt das Modell von Laurig nicht, und die Ermüdung hängt direkt von der Belastung und nicht von der Beanspruchung ab. Außerdem gibt es keine Differenzierung der Eigenschaften und Teilbelastungen hinsichtlich direkter Veränderung des Leistungsangebots und der Arbeitsermüdung einer Arbeitskraft.

¹⁸⁵ Vgl. Laurig, W.: Grundzüge der Ergonomie. 1992. S. 95

Das hier aufgestellte Modell berücksichtigt demgegenüber den zeitlichen Verlauf der Ermüdungsbeanspruchung sowie deren Parameter und leitet daraus eine Veränderung des Leistungsangebots entsprechend der Ermüdung und Erholung ab. Die Ermüdung ist also hier das Resultat der Ermüdungsbeanspruchung, die sich aus entsprechenden Belastungen und Eigenschaften der Arbeitskraft ergibt. Dies erscheint für das quantitative Simulationsmodell sinnvoller, denn damit beeinflussen sowohl die Teilbelastungen und ihr zeitlicher Verlauf als auch die Eigenschaften den unmittelbaren und langfristigen Rückgang der Leistungsfähigkeit infolge der Beanspruchung.

4.3.2 Parameter des Leistungs-Ermüdungsmodells

Die Ergonomie gliedert die Einflussgrößen für die Beanspruchung einer Arbeitskraft, wie in Kapitel 3.3 dargestellt, zunächst in meist individuelle Eigenschaften der Arbeitskraft und externe Belastungen durch die Arbeit und ihre Umstände. Für die ergonomischen Aspekte der Vorgabezeiten des agentenbasierten Bauablaufmodells werden drei Beanspruchungsgrößen unterschieden:

- Die Ermüdungsbeanspruchung resultiert je nach Charakter der Arbeiten aus unterschiedlichen Teilbelastungen sowie der entsprechenden Belastbarkeit der Arbeitskraft und führt zur Ermüdung der Arbeitskraft. Wegen des motorischen Charakters der Montagetätigkeiten stehen hier die körperlichen Belastungen sowie die körperliche Belastbarkeit im Fokus. Bei der reaktiven Tätigkeit des Baumaschinenführers eines Transportgeräts steht dagegen die Konzentration als Voraussetzung für Informationsverarbeitung und Reaktionsfähigkeit im Vordergrund.
- Die Fähigkeitsbeanspruchung entspricht der Differenz zwischen den für die Arbeitsaufgabe erforderlichen und den tatsächlich vorhandenen Fähigkeiten der Arbeitskraft.
- Die Bereitschaftsbeanspruchung gibt die Leistungsbereitschaft der Arbeitskraft infolge Tageszeit und Motivation an.

Die Berücksichtigung dieser Einflussgrößen in einem Modell erfordert die Integration von Kennwerten aus unterschiedlichsten Quellen, weshalb auch die in Kapitel 4.5 beschriebene Validierung und Justierung einen zentralen Arbeitsschritt darstellt. Hier werden zunächst die maßgebenden Teilbelastungen sowie Eigenschaften als Prozentwerte ausgedrückt. Als Durchschnittsgröße werden sowohl bei den Eigenschaften als auch bei den Teilbelastungen 100% angesetzt, d.h. eine durchschnittliche Arbeitskraft hat einen Eigenschaftswert von 100% und kann somit in der Summe 100% Belastung verkraften, ohne zu ermüden bzw. ohne dass sich ihr Leistungsangebot verändert.

4.3.2.1 Quantifizierung der Teilbelastungen

Aufgrund der vorwiegend energetischen Art der Montagearbeiten sind bei den ermüdenden Teilbelastungen körperliche Einwirkungen auf die Arbeitskraft zu bestimmen. Diese ergeben sich in einem Montagearbeitssystem für den Monteur zum einen aus dem zur Ausführung der Arbeitsaufgabe notwendigen Kraftaufwand sowie der einzunehmenden Arbeitsposition und zum anderen aus den Witterungsbedingungen der Arbeitsumgebung. Bei Baumaschinenführern stehen dagegen die einwirkenden Reize und deren Verarbeitung als Teilbelastungen aus der Arbeitsaufgabe im Vordergrund und werden wiederum durch die Witterungsbedingungen vervollständigt.

Die Quantifizierung der ermüdenden Teilbelastung aus der Arbeitsaufgabe für Montagetätigkeiten erfolgt mit dem AAWS (Automotive Assembly Worksheet).¹⁸⁶ Dieses für Montagearbeiten in der Automobilindustrie entwickelte Verfahren lässt sich gut auf Montagearbeiten in der Bauindustrie übertragen¹⁸⁷ und bewertet den Kraftaufwand und die Belastung infolge Arbeitsposition basierend auf dem aktuellen Forschungsstand der Ergonomie. Da im AAWS bis zu 25 Belastungspunkte als empfehlenswert eingestuft werden, sollten 25 AAWS-Punkte einer Teilbelastung von 100% entsprechen, denn man kann davon ausgehen, dass eine durchschnittliche Arbeitskraft diese Belastung ohne besondere Ermüdung verkraftet. Die AAWS-Punkte werden also mit dem Faktor 4 multipliziert, um die prozentuale Teilbelastung aus der Arbeitsaufgabe zu erhalten.

Die Bestimmung der Konzentrationsbelastung als ermüdende Teilbelastung für Baumaschinenführer orientiert sich an den Anforderungen einer Tätigkeit an die Konzentrationsfähigkeit der Arbeitskraft. Aufgrund des allgemeinen Charakters der DIN 10075 zur psychischen Arbeitsbelastung und entsprechenden tarifvertraglichen Vereinbarungen wird im Rahmen dieser Arbeit ein eigenes vierstufiges Schema zur Einordnung von Tätigkeiten entworfen. Es bezieht sich auf reaktive Tätigkeiten, bei denen sich die Anforderungen an die Konzentrationsfähigkeit aus der Menge der zu verarbeitenden Informationen ergeben. Das Schema differenziert geringe, mittlere, große und sehr große Menge an Signalen und Entscheidungen. Wie unten erläutert, besteht ein Zusammenhang zwischen Schulbildung und Konzentrationsfähigkeit, weshalb bei geringen Signal- und Entscheidungs-

¹⁸⁶ Vgl. Schaub (2004): Das „Automotive Assembly Worksheet“ (AAWS)

¹⁸⁷ Vgl. Stürmer (2007): Ein Beitrag zum Qualitätsmanagement im vorbeugenden baulichen Brandschutz S. 149 f.

mengen der Teilbelastungswert auf 100% gesetzt wird, je Stufe steigt dieser dann um 10% an.

Bei der ermüdenden Wirkung der Arbeitsumgebung stellt die Temperatur die maßgebliche Einflussgröße dar. Durch Baustellenzeitaufnahmen konnte Fetzner nachweisen, dass es zu temperaturabhängigen Abweichungen vom durchschnittlichen Aufwandswert kommt.¹⁸⁸ Basierend auf diesen Forschungsergebnissen wurde eine temperaturabhängige Funktion zur Ermittlung der Teilbelastung generiert. Bei der optimalen Arbeitstemperatur von 15°C wird die Teilbelastung als 0% angesehen, und bei der für die Arbeitsleistung schlechtesten beobachteten Temperatur von -10°C wird eine Teilbelastung aus der Arbeitsumgebung von 200% angesetzt. Damit ergibt sich der nachfolgend in Abbildung 25 graphisch aufbereitete Zusammenhang zwischen Temperatur und prozentualer Teilbelastung.

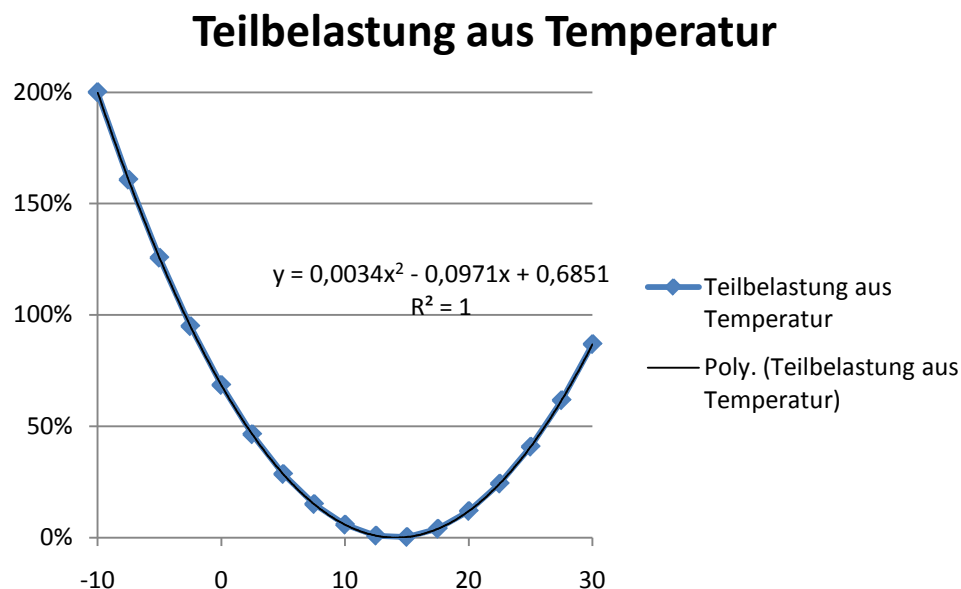


Abbildung 25: Ableitung der Teilbelastung infolge Temperatur entsprechend der Aufwandswerteveränderung für Mauerarbeiten nach Fetzner

Die Anforderungen einer Tätigkeit an die Arbeitskraft orientieren sich analog ihrer Qualifikation an den Lohngruppen des Rahmentarifvertrags. Die Belastung durch eine Tätigkeit wird für die Lohngruppe 3 „Facharbeiter/Baugeräteführer/Berufskraftfahrer“ mit 100% festgelegt. Je Lohngruppe, um

¹⁸⁸ Vgl. Fetzner, T.: Ein Verfahren zur Erfassung von Minderleistungen aufgrund witterungsbedingter Bauablaufstörungen. 2007. S. 196 ff.

die eine Tätigkeit höher oder niedriger eingestuft wird, liegt der Belastungswert um 10% höher oder niedriger.

Schließlich kann die als Tagesrhythmik bezeichnete Veränderung der Bereitschaft des Menschen zur Leistungserbringung in Abhängigkeit von der Tageszeit als Belastung verstanden werden. Die Leistungsbereitschaft in Abhängigkeit von der Tageszeit wird im Rahmen dieser Arbeit vereinfachend durch Belastungswerte für sechs Tagesabschnitte ersetzt. In Anlehnung an die physiologische Arbeitskurve nach Graf¹⁸⁹ liegt die Belastung zwischen 120% in der Nacht und 90% am Vormittag. Daraus ergibt sich der in Abbildung 26 dargestellte Verlauf.

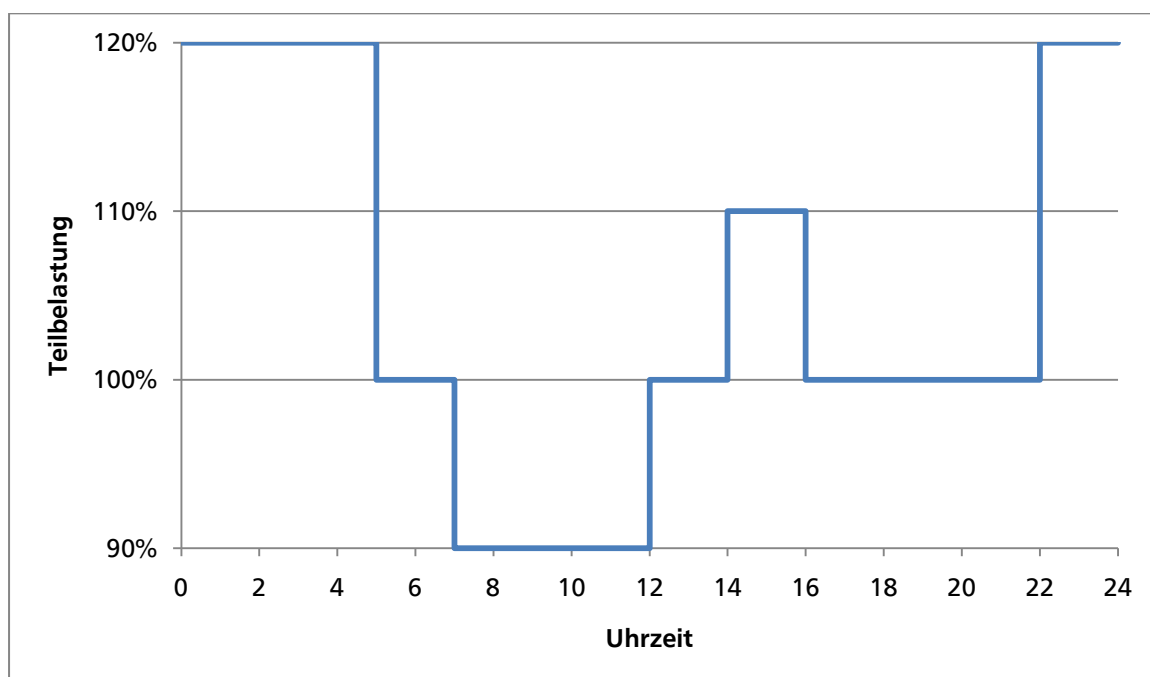


Abbildung 26: Modellierung der Teilbelastung in Anlehnung an die physiologische Arbeitskurve nach Graf

4.3.2.2 Quantifizierung der Eigenschaften

In Anlehnung an das ergonomische Belastungs-Beanspruchungsmodell werden im baubetrieblichen Leistungs-Ermüdungsmodell die Eigenschaften den Teilbelastungen gegenübergestellt. Jeder Teilbelastung aus der Arbeitsaufgabe und Arbeitsumgebung muss demnach eine Eigenschaft, die sich aus mehreren Faktoren zusammensetzen kann, gegenüberstehen. Damit ist es möglich, die individuelle Be-

¹⁸⁹ Vgl. Graf (1954): Begriff der Leistungsbereitschaft

anspruchung des Menschen zu bestimmen. Die Problematik der individuellen Bestimmung von Eigenschaftswerten im Rahmen der Arbeitsvorbereitung wird in Kapitel 5.2.1 erörtert.

Bei der Belastbarkeit wird zwischen der körperlichen und psychischen Belastbarkeit des Menschen unterschieden. Die Ermüdungsbeanspruchung einer Arbeitskraft infolge Kraftaufwand, Arbeitsposition und Umgebungstemperatur hängt maßgeblich von ihrer körperlichen Belastbarkeit ab. Die Ausprägung der körperlichen Belastbarkeit eines Menschen hängt von einer Vielzahl von Faktoren wie Alter, Geschlecht, Training usw. ab und kann auf vielfältige Weise messtechnisch als Kenngrößen erfasst werden.¹⁹⁰ Für das agentenbasierte, ergonomische Leistungs-Ermüdungsmodell ist vor allem entscheidend, welcher Eigenschaftswert einer Arbeitskraft zuzuordnen ist und wie häufig eine Arbeitskraft mit einer bestimmten Eigenschaft anzutreffen ist. Daher bezieht sich die Festlegung der prozentualen Ausprägung der körperlichen Belastbarkeit auf die Häufigkeitsverteilung von entsprechenden Kenngrößen. Um dies zu erreichen, wird für das 50%-Perzentil der relevanten Personengruppe ein Eigenschaftswert von 100% festgesetzt. Für das 5%- und 95%-Perzentil wird bestimmt, dass der Eigenschaftswert um 50% niedriger bzw. höher ist, d.h. ein Mensch, dessen körperliche Belastbarkeit besser ist als bei 95% der Arbeitskräfte, hat einen Eigenschaftswert von 150%. Vereinfachend wird angenommen, dass die Kenngrößen für die Arbeitskräfte normalverteilt sind und Zwischenwerte interpoliert werden können.

Eine Möglichkeit zur Bestimmung der körperlichen Belastbarkeit ist die Messung der Muskelkraft der Arbeitskräfte, um diese mit den Kraftwerten bei männlichen Probanden nach DIN 33411-5 zu vergleichen. Die Messergebnisse für 60% Armreichweite und einen Höhenwinkel von -15° bei über 1000 männlichen Probanden im Alter von 16 bis 62 Jahren und die zugehörige Körperhaltung sind in Abbildung 27 beispielhaft dargestellt.

¹⁹⁰ Vgl. Schlick et al (2010): Arbeitswissenschaft, S. 89 ff.

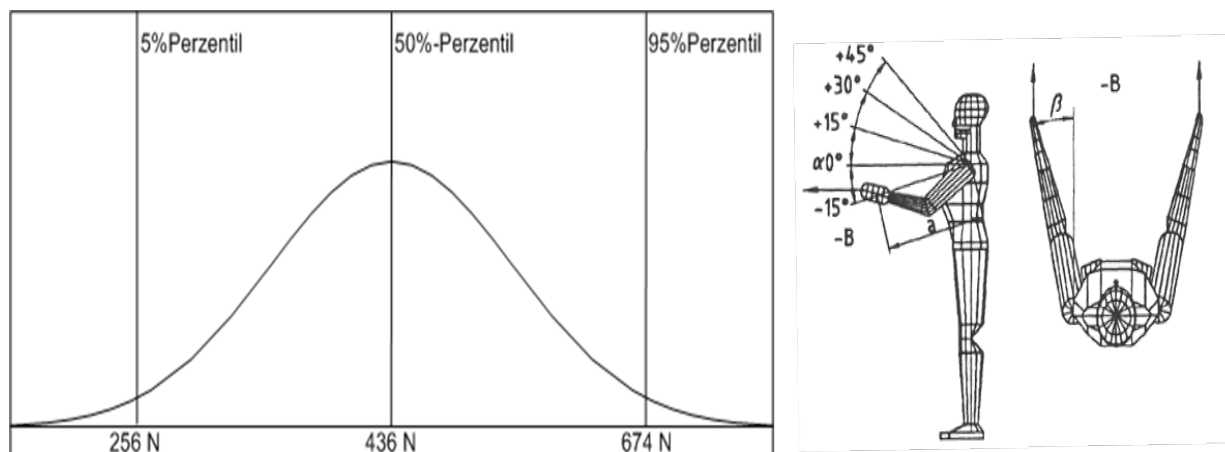


Abbildung 27: Kraftperzentile nach DIN 33411-5 Tab. 14 als möglicher Indikator der körperlichen Belastbarkeit einer Arbeitskraft

Die psychische Belastbarkeit als Belastbarkeit gegenüber psychischen Belastungen hat wie die körperliche Belastbarkeit eine Vielzahl an Einflussgrößen. Auch hier wird deshalb auf die Häufigkeitsverteilung passender Kenngrößen in der relevanten Personengruppe zurückgegriffen. Als Kenngröße kann beispielsweise das Ergebnis in einem Test zur selektiven Aufmerksamkeit mit INKA herangezogen werden.

Für die relevante Personengruppe der männlichen Absolventen der Haupt- und Realschule im Alter von 20-65 Jahren wird basierend auf den in Abbildung 28 dargestellten Ergebnissen das 50%-Perzentil auf ,6‘ festgelegt. Es entspricht dann einem Eigenschaftswert für die psychische Belastbarkeit bei gewerblichen Bauarbeitskräften von 100%.

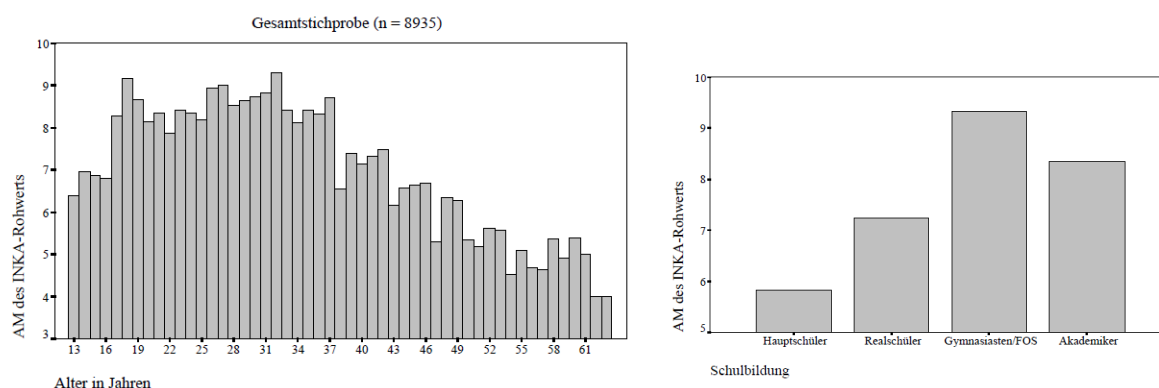


Abbildung 28: Abschneiden unterschiedlicher Personengruppen beim Aufmerksamkeitsstest INKA

Für die Bestimmung der Leistungsfähigkeit einer Arbeitskraft sind ihre berufliche Qualifikation sowie ihre Einübung und Einarbeitung zu berücksichtigen. Die Qua-

lifikation einer Arbeitskraft verläuft entlang zweier Dimensionen. Zum einen ist die fachliche Ausbildung maßgebend, zum anderen spielt aber auch die Berufserfahrung eine entscheidende Rolle. Die berufliche Qualifikation lässt sich entsprechend der sechs Lohngruppen im Bundesrahmentarifvertrag für das Baugewerbe (BRTV) wiedergeben, da dort sowohl Ausbildung als auch Berufserfahrung und Einsatzgebiet einer Arbeitskraft berücksichtigt werden. Als übliche Qualifikation einer Arbeitskraft wird entsprechend der Anforderungen die Lohngruppe 3 festgelegt und erhält einen Eigenschaftswert von 100%. Für jede Lohngruppe, die eine Arbeitskraft höher oder niedriger eingestuft ist, wird der Eigenschaftswert um 10% erhöht bzw. gesenkt.

Die Einarbeitung spielt gerade bei den wechselnden Einsatzorten gewerblicher Arbeitskräfte in der Bauindustrie eine wichtige Rolle. Sie hat zur Folge, dass eine Arbeitskraft erst nach fünfmaliger Ausführung einer Tätigkeit ihre volle Leistungsfähigkeit entfalten kann, wobei sich die zusätzlich benötigte Dauer von einer anfänglichen Verdoppelung mit jeder Wiederholung reduziert.¹⁹¹ Entsprechend beträgt der Eigenschaftswert bei den ersten Ausführungen einer Tätigkeit der Reihe nach 50%, 67%, 77%, 87% und 95%, um dann 100% zu erreichen.

Ein weiterer Einfluss ist die Einübung der Tätigkeiten bei der Montage eines definierten Systems, die mit der Lernkurve abgebildet werden kann. Im Rahmen dieser Arbeit wird in Anlehnung an entsprechende Forschungsarbeiten an der Universität Duisburg eine Kombination verschiedener Ansätze zur Abbildung der Lernkurve bei manuellen Montagetarbeiten verwendet. Die nachfolgend dargestellte Formel bildet die Montagedauer als erweiterte potentielle Funktion ab, wobei berücksichtigt wird, dass die Arbeitskräfte eine Vorerfahrung aus ähnlichen Tätigkeiten mitbringen können und es eine minimale Montagedauer gibt.¹⁹²

$$T(x) = T_e + (T_1 - T_e) \times (x + B)^{-b}$$

$T(x)$	<i>Dauer der x-ten Montage</i>	x	<i>Anzahl ausgeführter Montagen</i>
T_e	<i>minimale Montagedauer</i>	$-b$	<i>Ablaufexponent</i>
T_1	<i>Dauer der ersten Montage</i>	B	<i>Vorerfahrung</i>

$$\text{Lernfortschritt} = 1 + \left(\frac{T_1}{T_e} - 1 \right) \times (x + B)^{-b}$$

Formel 6: Berechnung der Einübung mit Hilfe von Lernkurven

¹⁹¹ Vgl. Reister [Hrsg.]: Nachträge beim Bauvertrag, S. 477 ff.

¹⁹² Vgl. de Greiff (2001): Die Prognose von Lernkurven in der manuellen Montage, S. 20 ff.

Die anfängliche Montagedauer T_1 ist um den Faktor 1,5 bis 4 größer als die Dauer T_e nach vielen Tausend Wiederholungen. Damit folgt für den Kehrwert des Lernfortschritts ein Wertebereich von 25% bis 100%. Der Ablaufexponent $-b$ nimmt üblicherweise Werte zwischen -0,25 und -0,70 an und die Vorerfahrung kann maximal den Wert 10 haben.

Die Motivation einer Arbeitskraft beeinflusst die Bereitschaft einer Arbeitskraft, ihre Leistungsfähigkeit produktiv einzusetzen. Sie kann allerdings nur schwer messtechnisch erfasst werden und wird daher hier basierend auf Beschreibungen quantifiziert. Es werden fünf Stufen von sehr gut bis sehr schlecht unterschieden, deren Wertung sich um jeweils ein Zehntel unterscheidet.

4.3.2.3 Übersicht der ergonomischen Parameter

Die Eigenschaften und Belastungen, die als Parameter für das Leistungs-Ermüdungsmodell dienen, werden hier zusammengefasst. Tabelle 5 gibt einen Überblick über die ergonomischen Parameter zur Bestimmung der Beanspruchungen sowie die zugehörigen Einflussgrößen, Zusammenhänge und Wertebereiche. Aus diesen ergeben sich über die entsprechenden Beanspruchungen die Ermüdung und das Leistungsangebot zur Berechnung der Grund- und Erholzeiten.

Teilbelastung/ Eigenschaft	Einflussgröße	Zusammenhang	Wertebereich
Arbeitsaufgabe	AAWS-Punkte, Informationen	4 x AAWS-Punkte, Menge: gering ... sehr groß	0 ... 400% 100 ... 140%
Arbeitsumge- bung	Temperatur	$0,02 \times T^2 - 0,46 \times T + 2,44$	0 ... 200%
Anforderungen	Tätigkeit nach BRTV	Lohngruppe 3 = 100%	80 ... 130%
Tagesrhythmik	Tageszeit	drei Bereiche nach Tagesganglinie	90 ... 110%
Belastbarkeit	z.B. Muskelkraft, Aufmerksamkeit	5%-Perzentil = 50%, 50%-Perzentil = 100%	50 ... 150%
Leistungs- fähigkeit	Qualifikation, Einarbeitung & Lernfortschritt	Lohngruppe 3 (BRTV) = $100\% \times \text{Einarbeitungseffekt}$ $\times \frac{1}{\text{Lernfortschritt}}$	10 ... 130%
Motivation	innere & äußere Antriebe	10%-Abstufungen von sehr schlecht ... sehr gut	80 ... 120%

Tabelle 5: Einflussgrößen der Teilbelastungen und Eigenschaften

Da die in Tabelle 5 aufgelisteten Einflussgrößen aus unterschiedlichen Quellen stammen, ist es für die Anwendung in der Praxis erforderlich, die Wertebereiche basierend auf der Beobachtung realer Arbeitssysteme zu justieren.

4.3.3 Integration in das agentenbezogene Arbeitssystem

Die Integration des Leistungs-Ermüdungsmodells erfordert die Zuordnung der ergonomischen Einflussgrößen und Parameter sowie deren Berechnung innerhalb des Multiagentenmodells. Dies erfolgt über entsprechende Variablen der Agenten und Ressourcen (Bauteile) sowie der Umwelt und Algorithmen innerhalb des Verhaltens der Agenten und der Umwelt. Diese Zusammenhänge sind in der folgenden Abbildung 29 schematisch dargestellt.

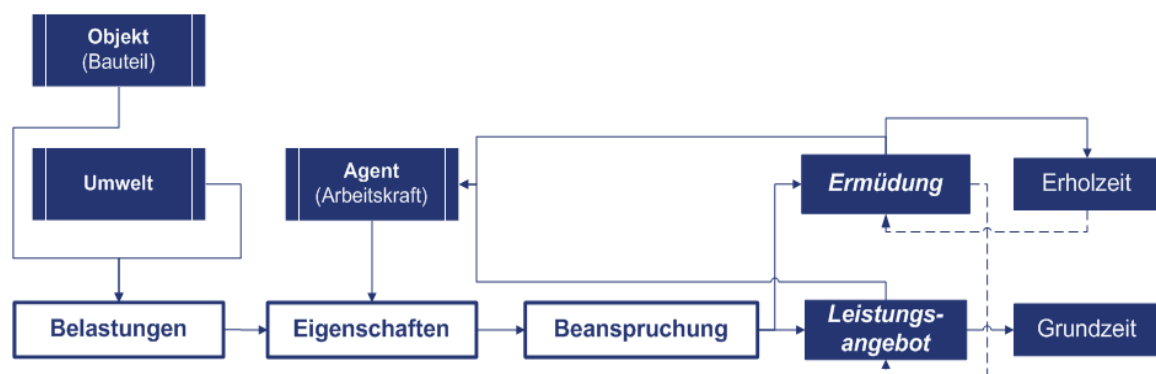


Abbildung 29: Zusammenhänge der ergonomischen Einflussgrößen, Zeitgrößen und des Multiagentenmodells

Als erster Schritt ist bei den Einflussgrößen zu differenzieren, ob sie im zeitlichen Rahmen eines Bauprojektes konstant oder veränderlich sind und bezogen auf welches Element des Multiagentenmodells sie ausgedrückt werden können. Die Zuordnung einer Einflussgröße zu einer Arbeitskraft bzw. zu einem Baugerät und dessen Baugeräteführer ist dann sinnvoll, wenn es sich um eine individuelle Größe, wie zum Beispiel die Qualifikation, handelt. Als Variable der Umwelt werden diejenigen Einflüsse ausgedrückt, die für die gesamte Baustelle identisch sind. Einflüsse, die bei jedem Bauelement unterschiedlich sein können, werden dem Bauelement, das eine Ressource im Multiagentenmodell ist, zugeordnet.

Als zweiten Schritt ist die Veränderlichkeit und Berechnung der Einflussgrößen und Parameter zu bestimmen. Zeitlich veränderliche Einflussgrößen erhalten einen Startwert und werden im Laufe der Experimente mittels Algorithmen im Agenten- oder Umweltverhalten manipuliert. Konstante Einflüsse können dagegen einfach beim Aufstellen des Modells bzw. des Szenarios festgelegt werden. Die veränderlichen Einflussgrößen werden vom zugeordneten Element neu berechnet,

wenn das Berechnungsintervall verstrichen ist. Die ergonomischen Parameter, die direkt oder indirekt die Grund- und Erholzeiten beeinflussen, sind den einzelnen Agenten zugeordnet und werden auch von diesen ermittelt. Die Berechnung erfolgt zu Beginn jeder Montagetätigkeit bzw. jedes Transportzyklus'. Eine Ausnahme hierzu bildet die Ermüdung, die bei jedem zeitlichen Tick der Simulation, also jede Minute entsprechend der Ermüdungsbeanspruchung, der aktuellen Tätigkeit des Agenten verändert wird.

Zusammenfassend sind die Veränderlichkeit, das Berechnungsintervall und die Zuordnung aller Einflussgrößen und Parameter in Tabelle 6 aufgelistet.

Einflussgröße/ Parameter	Zuordnung	Veränderlichkeit	Berechnungs- intervall
AAWS-Punkte, Informationen	Objekt (Bauelement)	konstant	konstant
Temperatur	Umwelt	zeitlich veränderlich	Stunde
Tätigkeit nach BRTV	Objekt (Bauelement)	konstant	konstant
Tageszeit	Umwelt	zeitlich veränderlich	zeitlich veränderlich
z.B. Muskelkraft, Aufmerksamkeit	Agent (Arbeitskraft)	konstant	konstant
Qualifikation & Einarbeitung, Lernfortschritt	Agent (Arbeitskraft)	konstant zeitl. veränderlich	konstant Montagezyklus
innere & äußere Antriebe	Agent (Arbeitskraft)	i.d.R. konstant	i.d.R. konstant
Belastungen	Agent (Arbeitskraft)	zeitlich veränderlich	Tätigkeit/ Transportzyklus
Eigenschaften	Agent (Arbeitskraft)	i.d.R. konstant	Tätigkeit/ Transportzyklus
Beanspruchungen	Agent (Arbeitskraft)	zeitlich veränderlich	Tätigkeit/ Transportzyklus
Ermüdung	Agent (Arbeitskraft)	zeitlich veränderlich	Tick (Minute)
Leistungsangebot	Agent (Arbeitskraft)	zeitlich veränderlich	Tätigkeit/ Transportzyklus

Tabelle 6: Zuordnung und Veränderlichkeit der Einflussgrößen und Parameter

4.3.4 Gegenüberstellung arbeitswissenschaftlicher Konzepte und deren Abwandlung im Leistungs-Ermüdungsmodell

Zur Verdeutlichung und Begründung der Abweichungen zwischen den in Kapitel 3 vorgestellten arbeitswissenschaftlichen Konzepten und deren Verwendung im Leistungs-Ermüdungsmodell sind die Unterschiede in Tabelle 7 zusammengefasst.

Arbeitswissen- schaftliches Konzept	Problematik	Baubetrieb- liche Modellierung
Motivation	Motivation wird im vereinfachten Belastungs-Beanspruchungsmodell nicht explizit behandelt; bei REFA wird die Motivation als Bestandteil der Antriebe gesehen	Eigenschaft
Tageszeit	Tageszeit als intraindividuell schwankende Eigenschaften ergibt widersprüchliche Implementierung, daher: Belastung	Belastung
Berechnung des Leistungsangebots	Berechnung nach REFA ist nicht mit Ansätzen auf Basis des vereinfachten Belastungs-Beanspruchungsmodells nach Rohmert kompatibel	Funktion von: zwei Teilbeanspruchungen & Ermüdung
Fähigkeiten, Disposition & Antriebe	Leistungseinflüsse nach REFA entsprechen nicht den Ansätzen nach Rohmert, aber beide haben ähnliche Inhalte, daher: Transformation	vergleichbare Eigenschaften
Ermüdung	Zirkelschluss, da die Beanspruchung zur Ermüdung und damit einer Eigenschaftsveränderung führt und die Beanspruchung von den Eigenschaften abhängt.	unabhängige Variable
Erholung	Auswirkung der Erholung auf Ermüdung lässt sich am besten als eigene Konstante modellieren	unabhängige Konstante

Tabelle 7: Gegenüberstellung arbeitswissenschaftlicher Konzepte und deren baubetriebliche Modellierung für die Ermittlung der Leistung von Arbeitskräften

Zwischen Rohmerts Belastungs-Beanspruchungsmodell und der REFA-Methodik gibt es bei der Strukturierung und Benennung der Leistungseinflüsse einige Diskrepanzen innerhalb der Arbeitswissenschaften. Da sich die grundsätzlichen Aus-

sagen bezüglich der Zusammenhänge ähneln, wurde für das baubetriebliche Modell zur Bauablaufsimulation eine eigene Struktur in Anlehnung an Rohmert entworfen. Hierbei wurde zur Abbildung der Ermüdung ein eigener Ansatz entwickelt, der simulationstauglich und widerspruchsfrei ist.

Aus dem Entwurf mehrerer Teilbeanspruchungen und deren prozentualer Skalierung ergaben sich die verwendeten mathematischen Zusammenhänge zwischen den Belastungen, Eigenschaften und Beanspruchungen sowie der Ermüdung, Erholung und dem Leistungsangebot einer Arbeitskraft im Leistungs-Ermüdungsmodell.

4.4 Abbildung des Bauablaufs in einem baubetrieblichen Multiagentenmodell

Nachdem in den vorherigen drei Abschnitten dieses Kapitels das Vorgehen zur Formulierung eines abstrakten Modells beschrieben wurde, wird im Folgenden die Vorgehensweise zur Aufstellung eines lauffähigen Multiagentenmodells beschrieben. Hierfür ist zunächst eine genaue Spezifikation des bestehenden abstrakten Multiagentenmodells aus Arbeitssystem und Ergonomie notwendig. Anhand dieser Spezifikation kann die Implementierung eines lauffähigen Modells bestehend aus Agenten, deren Umwelt und passiven Objekten erfolgen.

Als Software-Werkzeug wird die in Abschnitt 2.1.3.2 beschriebene Simulationsumgebung SeSAM verwendet. SeSAM integriert Werkzeuge zur Spezifikation aller Entitäten des Multiagentenmodells in Anlehnung an UML und die Implementierung des Modells über eine graphische Benutzeroberfläche. Die Spezifikation umfasst dabei die Konkretisierung der Zustandsvariablen und ggf. des Verhaltens der Agenten, Ressourcen und der Umwelt.¹⁹³ Um später unterschiedliche Szenarien des Multiagentenmodells erzeugen zu können, wird die Konzeption der Klassen, aus denen sich Instanzen ableiten lassen, aus der objektorientierten Modellierung übernommen. Für jede Gruppe von Entitäten, aus denen das agentenbasierte Bauablaufmodell bestehen soll, wird eine Klasse definiert. Diese Klasse dient als Schablone für die Instanzen und gibt Zustandsvariablen, deren Standardwerte sowie im Fall der Umwelt und Agenten ein Verhalten vor.¹⁹⁴

¹⁹³ Vgl. Ochslein (2004): Vorgehensmodell [...] für Multiagentensimulationen, S. 56 f.

¹⁹⁴ Vgl. Klügl (2001): Multiagentensimulation, S. 142 ff.

Bei der Implementierung wird die Repräsentation von Raum und Zeit aus SeSAM genutzt und als Basisstruktur für die Kommunikation ein Plugin verwendet. Das Agentenverhalten wird basierend auf der UML-Spezifikation als Verhaltensgraph in SeSAM-IMPL umgesetzt. Gleiches gilt für das Verhalten der Umwelt sowie die Implementierung der Systemgrößen, Zustandsvariablen und passiver Objekte im Simulationsmodell. Die Experimente in SeSAM verlaufen rundenbasiert, d.h. jede handelnde Entität in einem Szenario kann in jedem ihrer Aktivitätsgraphen die entsprechenden Aktionen ausführen. Dabei wird als Basiseinheit der Zeit die Rundendauer auf ‚1 Minute‘ festgelegt.

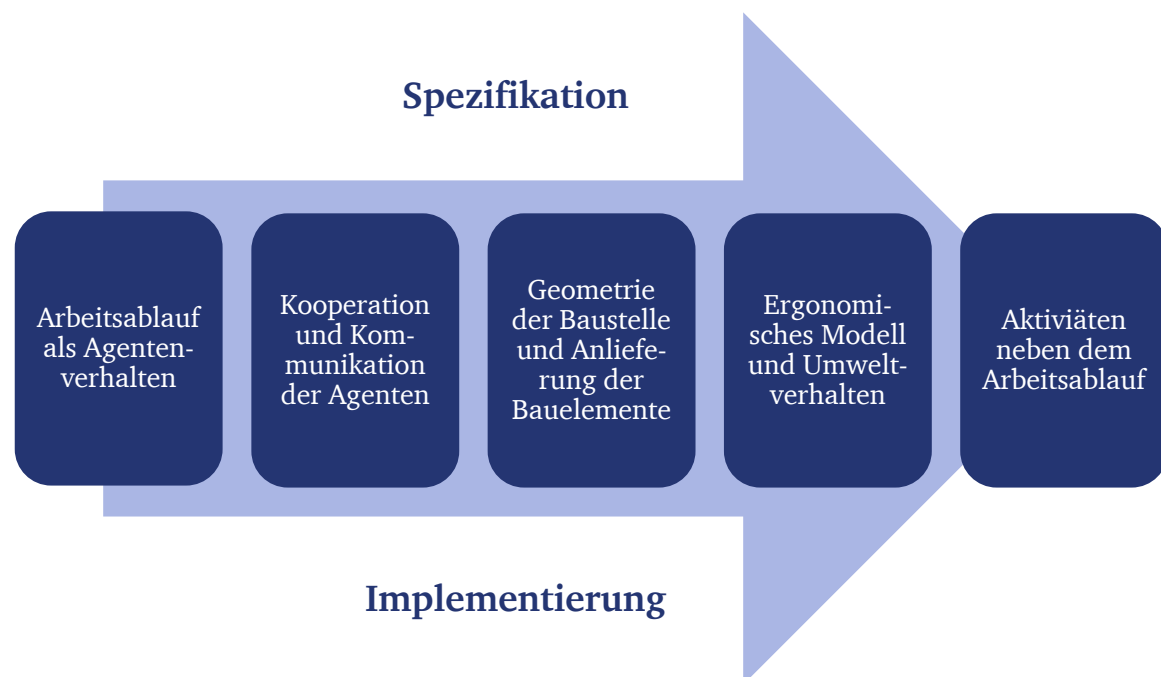


Abbildung 30: Teilaspekte der Spezifikation und Implementierung des Multiagentenmodells des Bauablaufs

Die Aufstellung eines lauffähigen Multiagentenmodells des Bauablaufs kann, wie in Abbildung 30 dargestellt, in fünf Teilaspekte gegliedert werden. Für jeden davon wird nachfolgend die Spezifikation sowie die auf ihr aufbauende Implementierung erläutert. Als erstes wird der Arbeitsablauf jeder Arbeitskraft als Verhalten eines Agenten umgesetzt, um dann die Kooperation der Arbeitskräfte mittels Kommunikation und Wahrnehmung von Veränderungen der Montagezustände einzelner Bauelemente zu modellieren. Außerdem werden die geometrischen Randbedingungen der Baustelleneinrichtung und des Gebäudes sowie die Anlieferung der Fertigteile abgebildet. Schließlich folgen die Umsetzung des ergonomischen Modells für die Arbeitskräfte und der hierfür maßgeblichen Umwelteinflüsse sowie die Integration der Aktivitäten, die neben dem Arbeitsablauf ausgeführt werden.

4.4.1 Modellierung des Arbeitsablaufs als Agentenverhalten

Der Arbeitsablauf ist das Element des Arbeitssystems nach REFA, in dem die Abfolge des Zusammenwirkens der Arbeitskräfte und Betriebsmittel mit der Eingabe des Arbeitssystems beschrieben wird. Dabei handelt es sich um den Grundzyklus der Tätigkeiten bestehend aus dem produktiven Zusammenwirken von Mensch und Betriebsmittel zur Veränderung der Eingabe im Sinne der Arbeitsaufgabe. Diese Tätigkeitsfolge kann im Multiagentenmodell als Verhalten der Agentenklassen, die Arbeitskräfte mit einer bestimmten Funktion abbilden, modelliert werden. Ein Montagearbeitssystem, wie es hier abgebildet werden soll, enthält i.d.R. zwei Klassen von Arbeitskräften. Zum einen Monteure, die allein oder als Kolonne die Montage der Fertigteile ausführen, und zum anderen die Geräteführer des Transportgeräts, das die Fertigteile von der Anlieferstelle bzw. dem Lagerplatz an den Montageort bringt.

4.4.1.1 Spezifikation des Verhaltens von Monteur- und Transportagenten

Das Verhalten eines Monteuragenten bei der Ausführung seiner Montagetätigkeit lässt sich aus der Montageanweisung des zu montierenden Bauelements ableiten. Hierzu sind die Abfolge und die jeweiligen Vorbedingungen der einzelnen Montageschritte im Agentenverhalten der Klasse ‚Monteur‘ zu modellieren. Um den zeitlichen Montagefortschritt nachzubilden, ist neben der technologischen Abfolge auch die Zeitdauer jedes einzelnen Montageschritts wiederzugeben. Außerdem müssen die erforderlichen Lauf- bzw. Fahrwege des Monteurs zum Montageort hin und wieder zurück in die Warteposition modelliert werden. Sind für die Montage mehrere Arbeitskräfte vorgesehen, so ist entweder ein entsprechender Kooperationsmechanismus vorzusehen, oder der Monteuragent ist als Montagekolonne bestehend aus mehreren Arbeitskräften mit entsprechenden Dauern zu definieren.

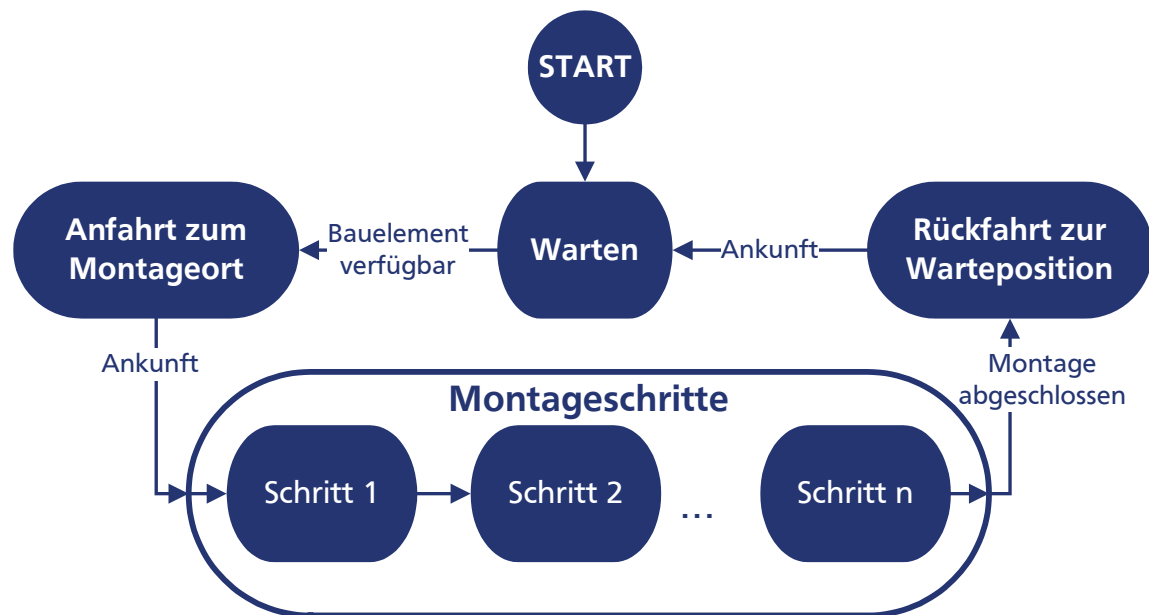


Abbildung 31: UML-Aktivitätsdiagramm des Grundzyklus eines Monteuragenten

Eine allgemeingültige Darstellung des Verhaltens eines Monteuragenten in Form eines Aktivitätsdiagramms ist in Abbildung 31 dargestellt. Dieses besteht aus der Verkettung mehrerer Aktivitäten, deren Struktur in Abbildung 33 näher beschrieben wird. Nach dem Start zu Beginn des Simulationsexperiments wartet der Monteuragent darauf, mit der Montage zu beginnen, sobald alle Vorbedingungen erfüllt sind. Nach Abschluss der Montage wartet er erneut, so dass man eine Endloschleife erhält. Das Ende der Montagetätigkeiten wird im Verhalten der Umwelt beschrieben, die dann die Aktivitäten der entsprechenden Agenten beziehungsweise das gesamte Simulationsexperiment beendet.

Die Klasse der Transportagenten hat die Aufgabe, die Fertigteile zum Montageort zu transportieren und dort in der Montageposition zu halten, bis der Monteur sie ausreichend befestigt oder gesichert hat. Meist repräsentiert der Transportagent ein Transportgerät, wie z.B. einen Turmdrehkran, Autokran oder Teleskopstapler, sowie dessen Baugeräteführer. Gegebenenfalls kann es aber auch mehrere Transportagenten geben, die zur Bewältigung der Transportaufgabe kooperieren. Als Standardfall der Aktivitäten während des produktiven Grundzyklus eines Transportagenten kann das in Abbildung 32 dargestellte Verhalten angesehen werden.

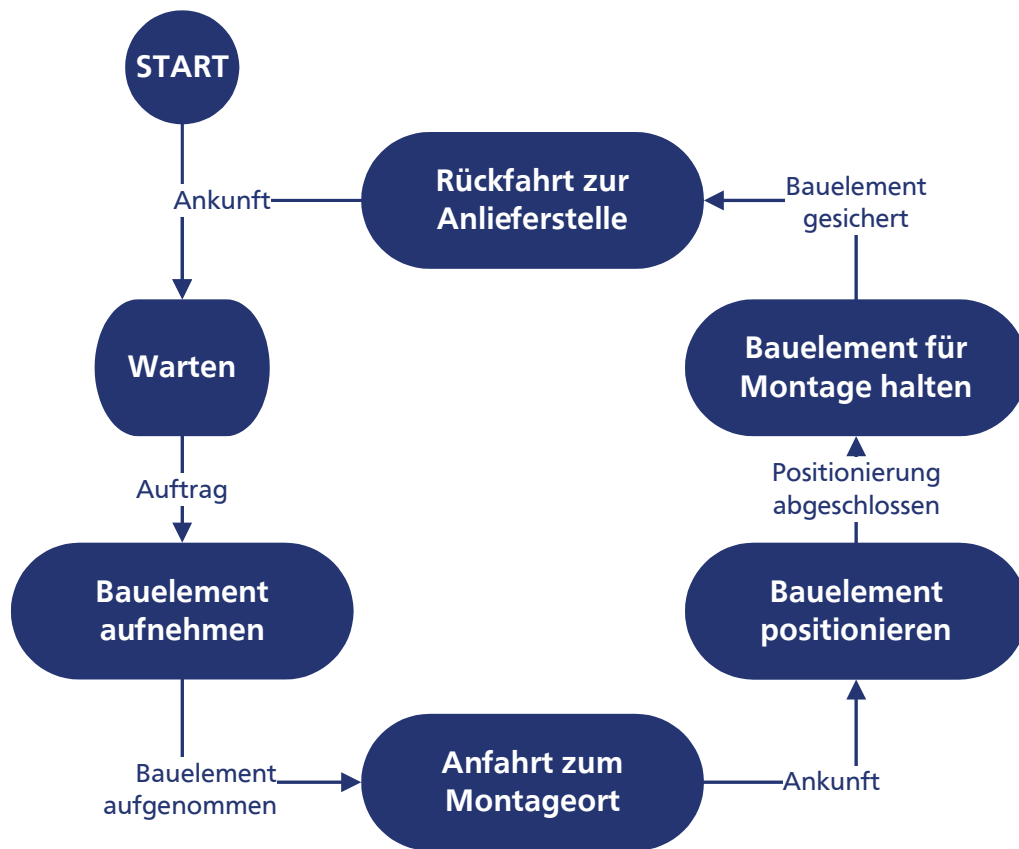


Abbildung 32: UML-Aktivitätsdiagramm des Grundverhaltens eines Transportagenten

Ergänzend zum Agentenverhalten sollen im Rahmen der Spezifikation der Agentenklasse auch wichtige Zustandsvariablen definiert werden. Wichtig sind vor allem die Dauer der einzelnen Aktivitäten zur Durchführung der Montage und des Transports. Außerdem ist der Arbeitsstatus bedeutsam, um zu jedem Zeitpunkt nachvollziehen zu können, ob der Monteur oder Baugeräteführer gerade tätig ist.

4.4.1.2 Implementierung des Verhaltens der Agenten bei der Montage

Bei der Implementierung werden die Festlegungen aus der Spezifikation in ein lauffähiges Modell überführt. Hierzu sind die vorgegebenen Variablen, Aktivitäten und deren Vorbedingungen umzusetzen und ggf. durch programmiertechnisch erforderliche Ausdrücke zu ergänzen. Die Variablen und auch das Agentenverhalten sind jeder Agentenklasse individuell zugeordnet. Die Aktivitäten bestehen dabei in SeSAM-IMPL aus Aktionen, die in jeder Runde ausgeführt werden, sowie aus Start- und End-Aktionen, die einmalig am Anfang respektive Ende der Aktivität ablaufen. Die Kanten zur Verbindung der einzelnen Aktivitäten des Agentenverhaltens werden in SeSAM-IMPL als Regeln bezeichnet. Es handelt sich dabei um Boolesche Ausdrücke wie zum Beispiel Variablenvergleiche, die als Ergebnis

WAHR oder *FALSCH* liefern. Sobald die Bedingung *WAHR* ist, wird die vorherige Aktivität beendet, und die nachfolgende Aktivität beginnt. Die Implementierung des zuvor spezifizierten Agentenverhaltens für den Montageablauf in SeSAM-IMPL soll hier anhand zweier Kernaspekte der Modellierung von Tätigkeiten der Arbeitskräfte erläutert werden.

Die Modellierung der Dauer einer Tätigkeit erfolgt, wie in Abbildung 33 dargestellt, mittels eines Zählers für die entsprechende Aktivität des Agenten. Der Zähler wird als ‚integer‘-Variable für den Agenten implementiert. Zu Beginn der Aktivität wird diese Zählvariable während der Start-Aktion auf einen Wert gesetzt, der sich nach der normierten Basis-Grundzeit und dem aktuellen Leistungsangebot der Arbeitskraft richtet. In jeder Runde, in der die Aktivität ausgeführt wird, wird der Wert der Zählvariable im Rahmen der Standard-Aktion um ‚1‘ reduziert. Sobald der Wert der Zählvariable auf ‚0‘ sinkt, wird die Bedingung zum Wechsel in den folgenden Tätigkeitsschritt aktiviert und die Tätigkeit endet.

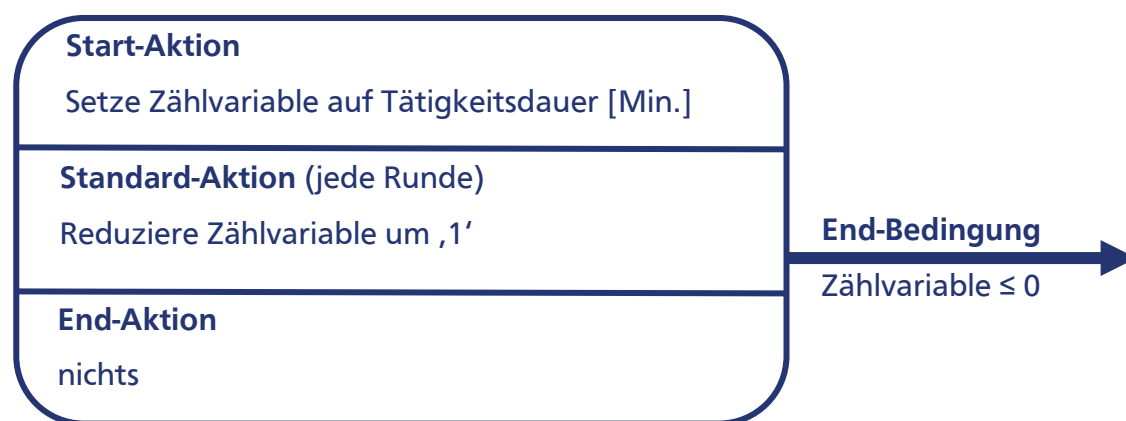


Abbildung 33: Aktivität zur Modellierung einer Tätigkeit mit Tätigkeitsdauer

Die Bewegung eines Agenten zu einem definierten Zielort ist ebenfalls zu implementieren. Wie man in Abbildung 34 sieht, kann hierfür auf die Repräsentation des Raumes und der Zeit in SeSAM zurückgegriffen und der Befehl ‚MoveTowardsPos‘ verwendet werden, da jeder Agent eine Geschwindigkeit und eine Position im Koordinatensystem seiner Umwelt besitzt. Bei der Ausführung des SeSAM-Impl-Befehls ‚MoveTowardsPos‘ bewegt sich ein Agent mit seiner Geschwindigkeit auf direktem Weg zu der vorgegebenen Position. Ordnet man jedem Bauelement seinen Montageort als Variable zu, kann man eine Aktivität implementieren, mit der ein Agent die entsprechende Position ausliest und sich an den richtigen Montageort begibt. Das Auslesen der Zielkoordinaten erfolgt dabei im Rahmen der Start-Aktion der Bewegungsaktivität, und die Abbruchregel besteht im Vergleich der aktuellen Position des Agenten mit der Zielposition.

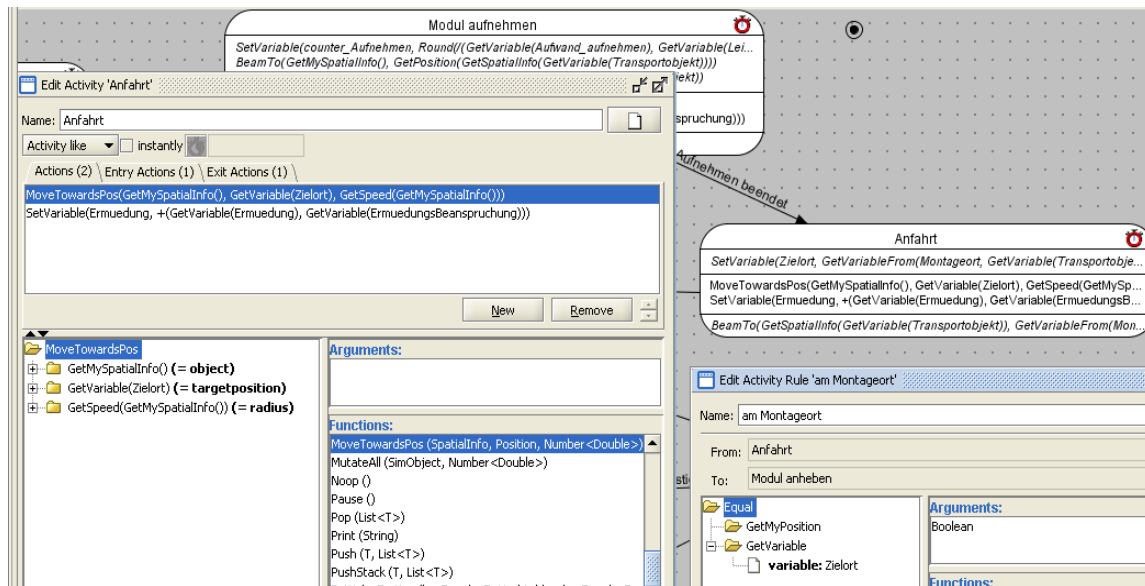


Abbildung 34: Implementierung der Anfahrt eines Transportagenten in SeSAM-IMPL

Alternativ dazu, dass der Agent stets den direkten Weg wählt, ist es in der agentenbasierten Modellierung denkbar, Fahrwege vorzudefinieren oder eine Wahrnehmung von Hindernissen zu implementieren. Die ist vor allem bei einer Simulation mit Fokus auf der Baulogistik sinnvoll. Bei der Modellierung von Kranen sind wiederum andere Randbedingungen und Vorgaben zu beachten, die sich ebenfalls agentenbasiert modellieren lassen.¹⁹⁵

4.4.2 Schema der Kooperation und Kommunikation von Agenten

Die Fähigkeit zur Kooperation und Kommunikation ist, wie bereits in Abschnitt 2.1.2 ausgeführt wurde, ein wesentliches Merkmal von Agenten in der Informatik und spielt auch bei der Ausführung von Bauarbeiten eine große Rolle. Ziel und Grund für eine Kooperation ist die effiziente Erfüllung gemeinsamer Aufgaben. Bei der Kooperation innerhalb einer Kolonne erfordert dies vor allem Absprachen hinsichtlich der Abfolge der Arbeitsschritte, die oft durch nonverbale Kommunikation möglich sind. Die Zusammenstellung der Kolonnen erfordert dagegen komplexere Kommunikationsprozesse.

¹⁹⁵ Vgl. Winzek (2010): Agentenbasierte Simulation der Baustellenlogistik, S. 21ff.

4.4.2.1 Spezifikation der Kooperations- und Kommunikationsschemata

Für die Zusammenarbeit der Agenten innerhalb einer Kolonne genügt eine indirekte Kommunikation mittels Variablenmanipulation wie sie schon Klügl beschreibt.¹⁹⁶ Dabei verändern der Transport- und der Montageagent Zustandsvariablen des Fertigteils, das gerade von ihnen gemeinsam bearbeitet wird, entsprechend dem jeweiligen Arbeitsfortschritt. Durch die Veränderung der Variablen ist es dann für die übrigen Agenten in der Kolonne möglich wahrzunehmen, wann eine bestimmte Tätigkeit abgeschlossen und damit ein definierter Zustand erreicht wurde.

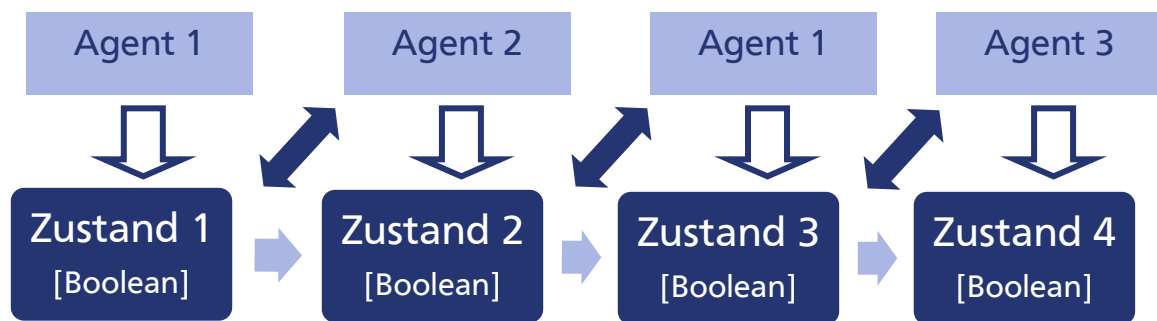


Abbildung 35: Zustandsvariablen eines Fertigteils und deren Manipulation

In Abbildung 35 ist dargestellt, welchen Status ein Fertigteil durchlaufen kann und wie unterschiedliche Agenten die zugehörige boolesche Zustandsvariable von *FALSCH* auf *WAHR* setzen. Zugleich können die anderen Agenten die Zustandsveränderung wahrnehmen, so dass der Agent, der nun mit seinen Aktivitäten beginnen kann, selbstständig erkennt, wann die Vorbedingungen erfüllt sind.

An der indirekten Kommunikation über den Status eines Bauelements nehmen die Agenten einer Kolonne mit dem Ziel der koordinierten Montage desselben teil. Letztlich entspricht dies den realen Begebenheiten auf einer Baustelle. Dort nehmen die verschiedenen Arbeitskräfte visuell wahr, wann die Vorleistungen ihrer Kollegen erbracht wurden, so dass sie selbst tätig werden können bzw. nicht mehr benötigt werden.

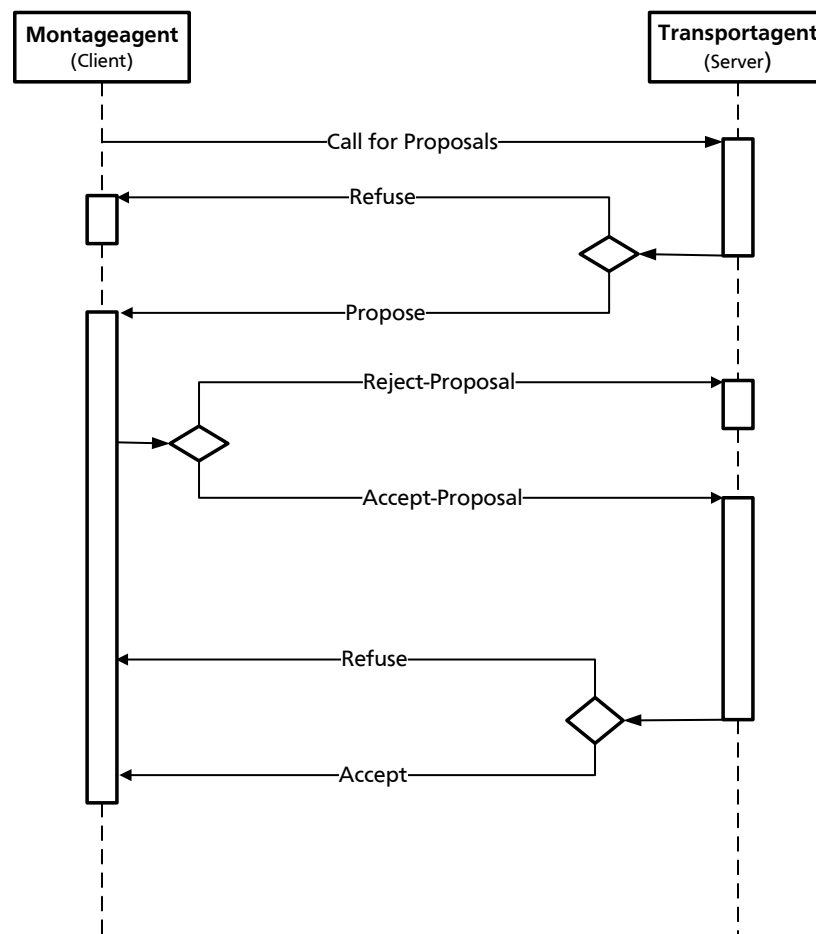
Zur Bildung einer Kolonne ist eine direkte Kommunikation der Agenten erforderlich. Um dies umsetzen zu können, werden i.d.R. Kommunikationsprotokolle eingesetzt, die Inhalt, Abfolge und Auswirkungen einzelner Sprechakte festlegen.¹⁹⁷

¹⁹⁶ Vgl. Klügl (2001): Multiagentensimulation, S. 116 ff.

¹⁹⁷ Vgl. Ferber: Multiagentensysteme, S. 353

Hier wird das in Abschnitt 2.1.2.3 beschriebene FIPA-ContractNet-Protokoll adaptiert, das der Einholung und Beantwortung von Geboten für eine bestimmte Aufgabe dient und in Abbildung 36 schematisch dargestellt ist. In der konkreten Umsetzung für die Bildung einer Kolonne aus einem Monteur und einem Stapler als Transportagenten fragt der Monteur alle im System befindlichen Transportagenten an, ob sie ein von ihm reserviertes Bauelement transportieren wollen, und die Transportagenten antworten entsprechend ihrem Arbeitsstatus. Ähnliche Abläufe sind auch für die Formierung einer Kolonne aus mehreren Monteuren denkbar. Dabei müsste der Vorarbeiter die Rolle des ‚Client‘ in der Kommunikation übernehmen. Für die Auswahl des besten Servers ist es denkbar, entsprechende Entscheidungskriterien zu formulieren und hierfür einen Preis, eine Distanz oder ähnliches anzufragen.

Die direkte Kommunikation nach dem ContractNet-Interaktionsprotokoll umfasst eine Reihe von Sprechakten zwischen einem Klienten und einer beliebigen Anzahl potentieller Anbieter. Dies entspricht dem Ablauf bestimmter Absprachen auf der Baustelle, wird in der Multiagentensimulation aber bewusst stärker eingesetzt als auf der Baustelle üblich, um Formen der optimalen Zusammenarbeit zu identifizieren. Denn auf der Baustelle gibt es häufig eine Vorauswahl der Kommunikations- und damit auch Kooperationspartner, wodurch möglicherweise bessere Konstellationen nicht zustande kommen, oder ein Polier fungiert als übergeordnete Instanz und legt basierend auf seinen ggf. unvollständigen Informationen und Kriterien die Zusammenarbeit der Arbeitskräfte und Baugeräte fest.

Abbildung 36: Umsetzung des FIPA-ContractNet Interaction Protocol¹⁹⁸

Zur Umsetzung dieses Kommunikationsprotokolls sind Verhaltensmuster bei den kommunizierenden Agenten erforderlich, die sich als Aktivitätsdiagramme in SeSAM-UML darstellen lassen. Auf Seiten des anfragenden Agenten wird zunächst potentiellen Anbietern eine Anfrage gesendet, dann werden die Antworten empfangen. Hier erscheint eine Umsetzung als ausreichend, bei der das erste Angebot eine Zusage erhält, während den späteren Anbietern abgesagt wird. Alternativ ist es auch denkbar, zuerst alle Angebote zu sammeln und dann nach definierten Kriterien den besten Anbieter auszuwählen. Auf Seiten der anbietenden Agenten muss die Anfrage jedes potentiellen Klienten empfangen und beantwortet werden. Hierzu ist zum jeweiligen Zeitpunkt die eigene Bereitschaft zur Auftragserfüllung zu prüfen, um dementsprechend mit einem Angebot oder einer Absage zu antworten.

¹⁹⁸ weiterentwickelt nach FIPA (2002): Contract Net Interaction Protocol Specification, S. 2

4.4.2.2 Implementierung der direkten Agentenkommunikation

Zur Implementierung der direkten Kommunikation der Agenten untereinander bietet SeSAM einen Kommunikations-Plugin an, der es ermöglicht, Nachrichten zu senden und zu empfangen. Eine Nachricht besteht hierbei aus einem Sender, einem Empfänger, einem Performativ, also einer Kommunikationsintention, sowie einem Nachrichteninhalt. Jeder Agent erhält eine Liste, in der die eingehenden Nachrichten gespeichert werden, so dass man sie der Reihe nach abgerufen kann.

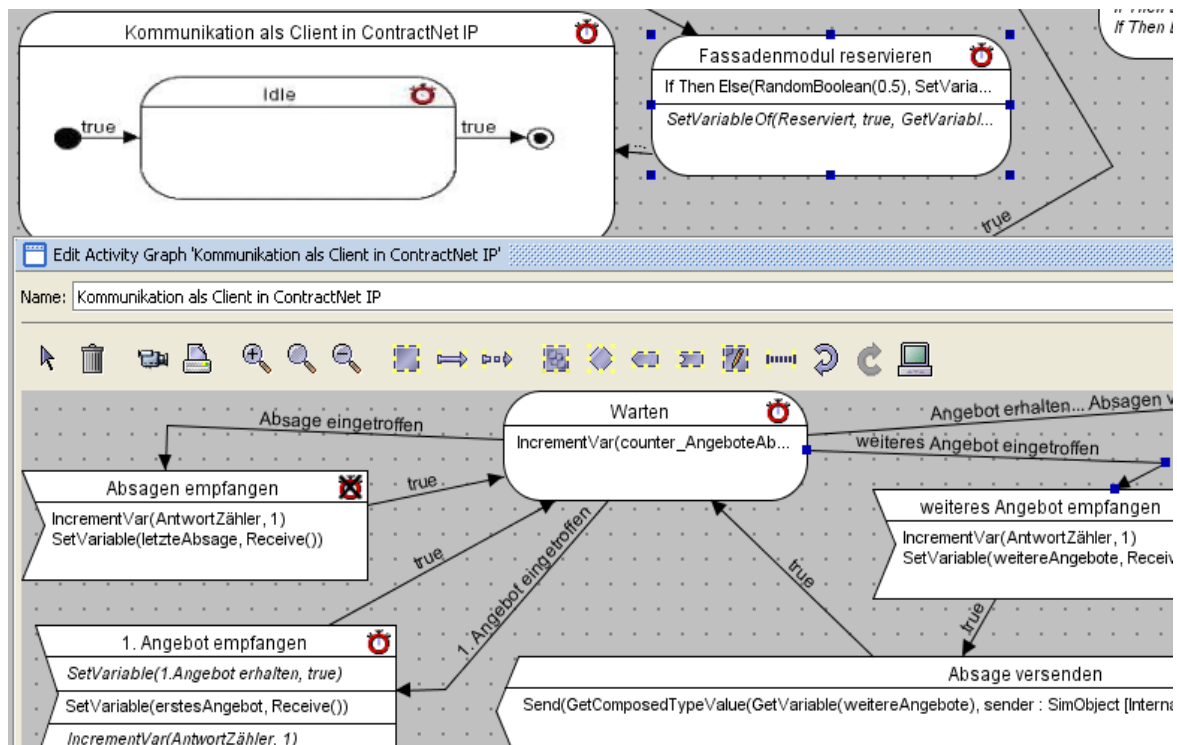


Abbildung 37: Reservierung und Kommunikation im Aktivitätsdiagramm des Montageagenten in SeSAM

Die einzelnen Kommunikationsaktivitäten können beim Klienten, wie in Abbildung 37 dargestellt, in einer komplexen Aktivität gebündelt werden, da dieser den Kommunikationszeitpunkt selbst festlegt. Die Kommunikation wird von ihm stets vor Beginn einer Montage, wie sie in Abschnitt 4.4.1 beschrieben ist, aber nach der Reservierung eines Bauelements eingeleitet, um einen Transportagenten zu finden. Die Anbieter von Leistungen müssen dagegen zu beliebigen Zeitpunkten während ihrer Aktivitäten auf Anfragen reagieren. Daher ist es erforderlich, die Kommunikationsaktivitäten so zu implementieren, dass sie parallel zu den übrigen Tätigkeiten ausgeführt werden. Dies ist in SeSAM durch Definition mehrerer Aktivitätsgraphen möglich, die in jeder Runde parallel ausgeführt werden.

4.4.3 Modell der Baustelle und der Anlieferung

Die Arbeitsumgebung der als Agenten modellierten Arbeitskräfte ist die Umwelt des Simulationsmodells. Sie repräsentiert Zeit und Raum sowie die äußeren Einflüsse auf die Montageprozesse, wie z.B. die Lage der Gebäude, die Anlieferung der Bauelemente sowie das Klima. Während in diesem Abschnitt die allgemeine Modellierung der Umwelt mit Gebäuden und Bauelementen sowie Raum und Zeit beschrieben wird, stellt der darauffolgende Abschnitt die Abbildung der Ergonomie im Multiagentenmodell der Montageprozesse dar.

4.4.3.1 Spezifikation der Simulationsumwelt

Die Umwelt eines Multiagentenmodells wird durch die Umweltklasse dargestellt, die in SeSAM ähnlich den Agenten ein Verhalten aufweist und zusätzlich über eine Karte verfügt. Die Karte ermöglicht dabei die Darstellung der räumlichen Ausdehnung der Umwelt und kann Instanzen der Agenten- und Ressourcenklassen beinhalten. Das Verhalten der Umweltklasse ermöglicht es, die zeitliche Veränderung der Umwelt sowie deren Interaktion mit den in ihr existierenden Agenten abzubilden.

Die Möglichkeiten der Modellierung von Raum und Zeit in einem Simulationsmodell richten sich stark nach dem Simulationswerkzeug. SeSAM bietet hier standardmäßig einen zweidimensionalen Raum an, der als Grundriss der Baustelle verwendet werden kann. Die entsprechenden Einschränkungen gelten aber nicht für die Multiagentensimulation im Allgemeinen, so dass auch agentenbasierte Bauablaufsimulation im dreidimensionalen Raum möglich ist. Als Längeneinheit im Koordinatensystem der Baustelle wurde ein Meter festgelegt.

Die rundenbasierte Abbildung der Zeit in SeSAM bedeutet, dass in jeder Runde, die als eine Minute definiert wird, jeder Agent seine Aktivitäten entsprechend seinem Aktivitätsgraphen ausführt. Dies erscheint generell für eine agentenbasierte Montageprozesssimulation sinnvoll, da die Handlungsdauern der als Agenten modellierten Arbeitskräfte nicht von der Komplexität ihrer Implementierung, sondern von der Dauer ihrer Tätigkeiten abhängen sollen. Darüber hinaus sind die Uhrzeit und der Arbeitstag zu protokollieren, da zwei Arbeitstage i.d.R. nicht genau gleich lang sind. Dies ergibt sich, weil an jedem Tag vor Feierabend die Montage des Bauelements abzuschließen ist. Als Regelarbeitszeit wird 07:00 Uhr bis 16:00 Uhr ohne Mittagspause angesehen.

Innerhalb der Umwelt eines agentenbasierten Modells einer Montagebaustelle gibt es mindestens zwei Arten von passiven Objekten. Dies sind zum einen die zu montierenden Bauelemente und zum anderen die bestehende Struktur zur Befestigung

der Bauelemente, wobei es sich beispielsweise um die Fundamente einer Stahlbauhalle oder ein zu modernisierendes Bestandsgebäude handeln kann. Beide werden als Ressourcenklassen modelliert, von denen dann beim Aufstellen eines Szenarios bzw. während dem Simulationsexperiment Instanzen erzeugt werden können. Neben den beiden beschriebenen Objekttypen ist es auch möglich, weitere Objekte, z.B. für Hindernisse oder Fahrwege, als Ressourcenklassen zu modellieren.

Weiterhin ist die Anlieferung der Fertigteile auf die Baustelle abzubilden, wobei die Lieferzeiten, der Lieferrhythmus bzw. die Bestellauslöser sowie die Anlieferstelle und die Liefermenge zu spezifizieren sind. Bei einer idealisierten Anlieferung werden immer dann neue Bauelemente angeliefert, wenn ein bestimmter Grenzwert der Lagermenge unterschritten wird. Dadurch befinden sich stets genügend zu montierende Bauelemente auf der Baustelle, so dass der Montagevorgang nicht beeinträchtigt wird. Ein UML-Diagramm, das eine solche Anlieferung abbildet, ist nachfolgend in Abbildung 38 dargestellt.

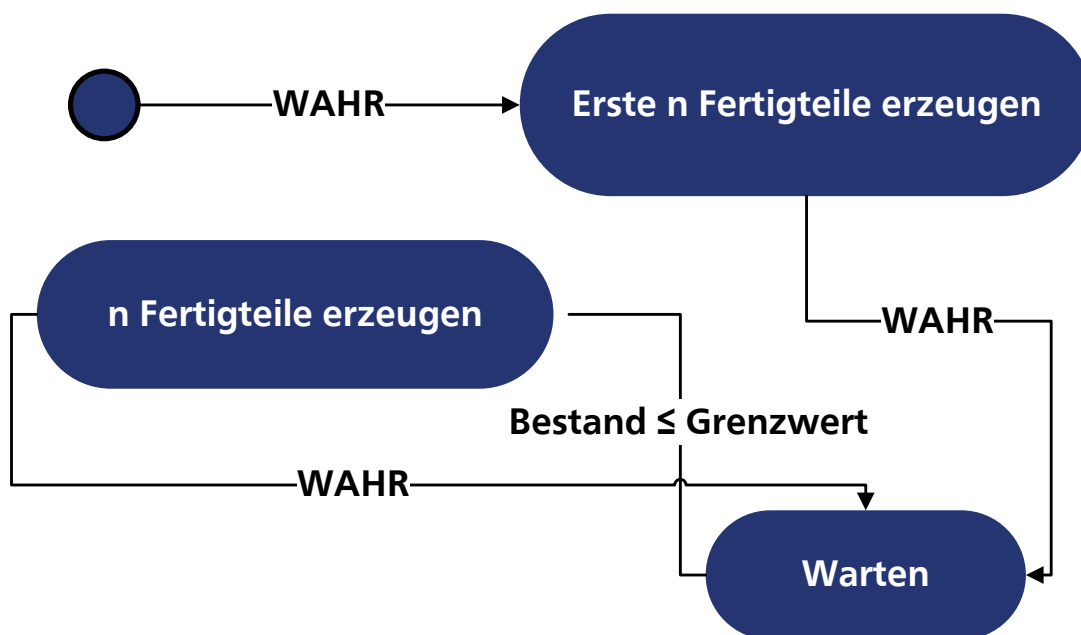


Abbildung 38: UML-Aktivitätsdiagramm der Anlieferung von Fertigteilen

Bei der Erzeugung jedes einzelnen Fertigteils sind diesem seine spezifischen Eigenschaften zuzuordnen. Vor allem für die Fertigteile ist die Definition ihrer Eigenschaften von zentraler Bedeutung, da sie sich meist vom Typ, ihrer Geometrie und dem Montageort unterscheiden. Geht man davon aus, dass die Fertigteile einem Raster folgend einzubauen sind, so ist es sinnvoll, zunächst das Fertigteil am

Ausgangspunkt dieses Rasters zu erzeugen und dann dem Raster folgend die Montageorte der übrigen Fertigteile zu bestimmen. Die Anzahl der je Lieferung zu erzeugenden Fertigteile richtet sich i.d.R. nach dem Ladevolumen des LKWs.

4.4.3.2 Implementierung der Ressourcen und des Umweltagenten

Die passiven Objekte werden in SeSAM über Ressourcenklassen modelliert, die Zustandsvariablen besitzen aber kein eigenes Verhalten. Während die Ressourcenklassen also weniger komplex und ausdrucksmächtig sind als Agentenklassen, stellt die Umweltklasse eine Erweiterung des Agentenkonzepts dar. So besitzt eine Umweltklasse neben den üblichen Merkmalen eines Agenten noch eine räumliche Komponente und kann die Zeit abbilden.

Die Anlieferung der Fertigteile erfolgt im lauffähigen Multiagentenmodell, indem das in Abbildung 38 dargestellte UML-Diagramm als ein Aktivitätsgraph des Umweltagenten implementiert wird. Statt eines Transports der Bauelemente auf die Baustelle werden die entsprechenden Ressourcen in der Implementierung an der Anlieferstelle erschaffen. Die Eigenschaften der Fertigteile werden dabei als Variablen mit unveränderlichem Wert modelliert, während die Statusvariablen von Agenten manipuliert werden können. Werte werden den Eigenschaftsvariablen entweder während der Modellierung über Standardwerte oder im Rahmen der Erzeugung der Bauelement-Ressource zugewiesen. Gleiches gilt auch für die Geometrie und den Montageort.

Die Zuweisung von Nicht-Standardwerten für die Eigenschaftsvariablen der Bauelemente erfolgt während der Erschaffung des Bauelements durch die Umwelt. Die Implementierung dieses Vorgangs in SeSAM ist in Abbildung 39 dargestellt. Der Montageort wird über x- und y-Koordinaten entsprechend dem Montageraster beschrieben. Bei regelmäßigen Abfolgen der Typen und Geometrie ist die Berechnung der Werte mit einem Algorithmus auch für diese Eigenschaften möglich, ansonsten sind die unregelmäßigen Elementeeigenschaften in einer Liste vorzugeben, die der Reihe nach ausgelesen wird.

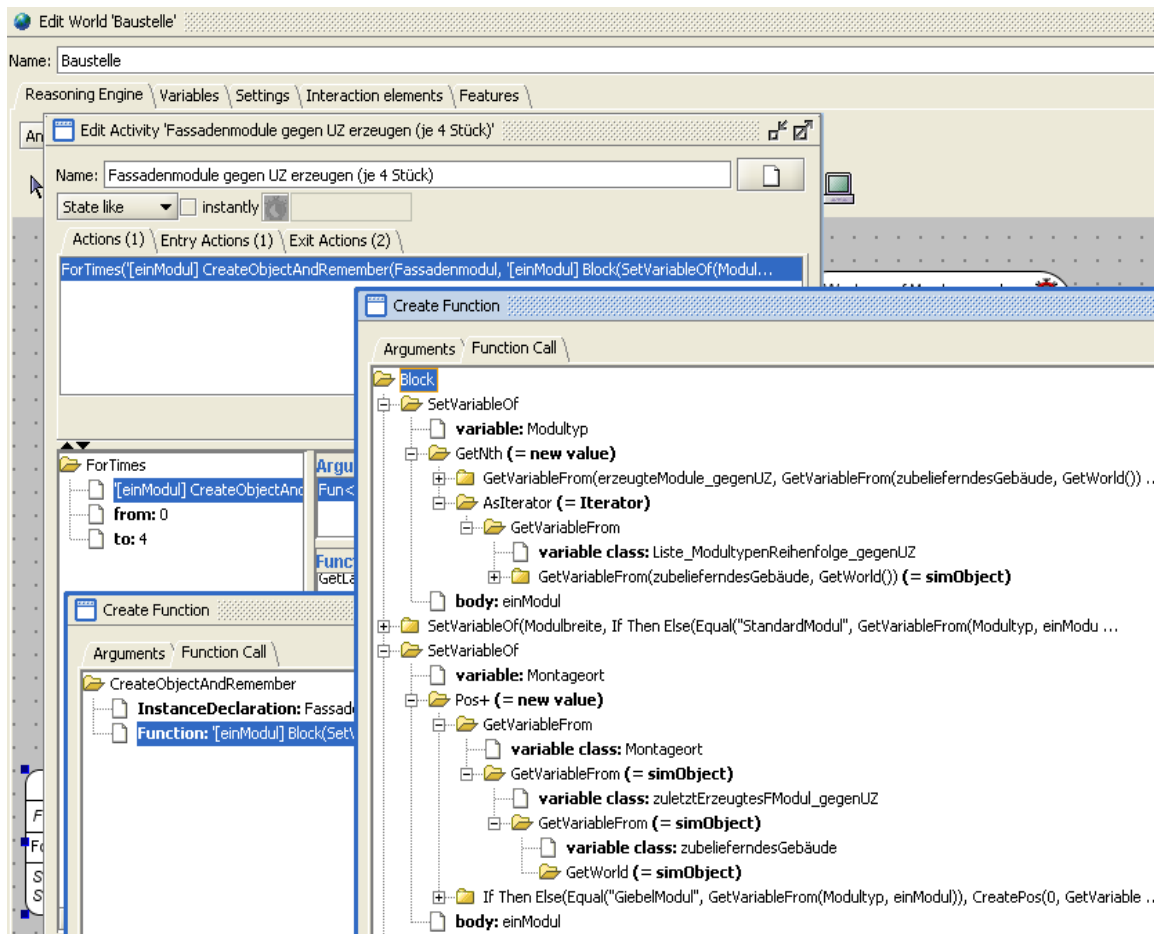


Abbildung 39: Beispielhafte Implementierung der Erzeugung von Fertigteilen durch die Umwelt in SeSAM

4.4.4 Abbildung der Ergonomie und zugehöriger Einflussfaktoren

Um das in Kapitel 4.3 beschriebene baubetriebliche Leistungs-Ermüdungsmodell auf Basis der Ergonomie in ein lauffähiges agentenbasiertes Modell zu überführen, sind die mathematischen Zusammenhänge zwischen den ergonomischen Einflussfaktoren und den Tätigkeits- und Erholdauern in lauffähige Algorithmen zu überführen. Dabei kann auf die Zuordnung der ergonomischen Begriffe zu Entitäten des Multiagentenmodells in Abschnitt 4.3.3 zurückgegriffen werden. Ziel der Spezifikation und Implementierung ist es, die allgemein formulierten Zusammenhänge insbesondere hinsichtlich ihrer zeitlichen Veränderung zu konkretisieren und im Verhalten sowie den Variablen des lauffähigen Multiagentenmodells umzusetzen.

4.4.4.1 Spezifikation des ergonomischen Modells für Agenten

Es lassen sich im ergonomischen Leistungs-Ermüdungsmodell vier Einflüsse auf das Leistungsangebot der Arbeitskraft identifizieren, die zeitlich veränderlich sind. Die Witterung und Tageszeit sind dabei der Umwelt zuzuordnen, während die Einarbeitung und Ermüdung sich aus den Tätigkeiten der Arbeitskraft ergeben. Die ergonomischen Parameter, die sich basierend auf den ergonomischen Einflussfaktoren berechnen lassen, haben dann direkte oder indirekte Auswirkungen auf die Leistung der Arbeitskraft und damit die Grundzeit.

Zur Bestimmung der Leistungsbereitschaft entsprechend der Tagesganglinie ist die Tageszeit zu bestimmen, d.h. es muss möglich sein, die Uhrzeit während des Simulationsexperiments abzufragen. Der Prozentwert für die Belastung aus der Tagesrhythmik ergibt sich dann entsprechend der jeweiligen Uhrzeit zu Werten zwischen 90% am Vormittag und 120% während der Nacht. Die Witterung wird beispielhaft über die Temperatur modelliert, kann aber auch weitere Aspekte wie Wind oder Niederschlag umfassen. Für die Temperatur wird ein Tagesmaximum angegeben, an dem sich die tatsächliche Temperatur insofern orientiert, dass es um 07:00 Uhr 5°C kälter ist und die Tageshöchsttemperatur dann um 10:00 Uhr erreicht wird.

Der Einarbeitungseffekt wird berücksichtigt, indem die Einarbeitung jeder Arbeitskraft standardmäßig den Wert 50% hat und nach Mitwirkung bei der Montage eines Bauelements in fünf Schritten auf 100% ansteigt. Auch der Lernfortschritt verändert sich mit der Anzahl an Montagen, wobei er sich baustellenübergreifend entsprechend der Montagen gleichartiger Fertigteile einstellt.

Die Ermüdung einer Arbeitskraft baut sich während ermüdenden Tätigkeiten der Arbeitskraft auf und wird während Erholpausen abgebaut. Die Ermüdungsbelastung wird dabei für jede Tätigkeit als konstant angenommen und ergibt sich aus der Temperatur- und der Arbeitsaufgabenbelastung. Je Zeiteinheit in der die Tätigkeit ausgeführt wird, steigt dann die Ermüdung um einen entsprechenden Betrag an. Umgekehrt sinkt die Ermüdung je Zeiteinheit, in der die Arbeitskraft eine Erholpause macht, wobei Wartezeiten nicht als Erholpausen angesehen werden. Die Erholpausen sollen nach Abschluss einer Montage zufallsgesteuert erfolgen, wobei zu berücksichtigen ist, dass die Entscheidung, sich zu erholen, von den Arbeitskräften umso wahrscheinlicher getroffen wird, je höher ihre Ermüdung ist.

Die Berechnung der Parameter, die das Leistungsangebot einer Arbeitskraft bestimmen, erfolgt jeweils vor Beginn einer Tätigkeit, so dass aus den aktuellen Werten die Dauer der Tätigkeit bestimmt wird. Die Dauer einer Tätigkeit bezieht sich also immer auf die Temperatur, Tageszeit, Ermüdung etc. zum Tätigkeitsbeginn und ist von der individuellen Arbeitskraft abhängig. Alle hierzu verwendeten

Formeln sind in 4.3 dokumentiert. Um im Rahmen der Verifikation und Validierung des Modells den Einfluss des sich ergebenden Leistungsangebots auf die Tätigkeitsdauer anpassen zu können, wird ein für die gesamte Baustelle gültiger Justierparameter j für die Leistung eingeführt.

4.4.4.2 Implementierung der Ergonomie in den Agenten und deren Umwelt

Witterung und Zeitverlauf können als ein Verhalten der Umwelt im Multiagentenmodell implementiert werden. Dazu werden bei einer Baustelle im Ein-Schicht-Betrieb drei im Tagesverlauf aufeinander folgende Aktivitäten erzeugt. Am Vormittag liegt die Temperatur noch unter dem Tagesmaximum. Tagsüber wird dann das Tagesmaximum erreicht. Wenn schließlich das letzte Bauelement des Tages montiert wurde, beginnt der Feierabend, und alle Werte werden zurückgesetzt.

Um den Anstieg der Ermüdung zu implementieren, wird in der Start-Aktion einer Aktivität zur Abbildung von Tätigkeiten einer Arbeitskraft die Ermüdungsbeanspruchung dieser Tätigkeit bestimmt. Ist der Beanspruchungswert positiv, so wird die Ermüdung in jeder Runde, in der die Tätigkeit ausgeführt wird, um den Beanspruchungswert inkrementiert. Die Erholpausen zum Abbau der Ermüdung sind als eigene Aktivität im Aktivitätsgraphen jeder Agentenklasse implementiert. Zunächst wird über einen Zufallswert, der durch die Höhe der Ermüdung beeinflusst wird, ermittelt, ob die Arbeitskraft eine Erholpause macht. Ist dies der Fall, so wird die Ermüdung in jeder Runde um den fixen Erholwert der Arbeitskraft reduziert.

Die ergonomischen Parameter können in SeSAm, wie in Abbildung 40 zu sehen ist, als benutzerdefinierte Funktion (User Function) implementiert werden, so dass sie nicht bei jedem Aufruf komplett neu formuliert werden müssen. Zu Beginn der Aktivität eines Agenten werden als Start-Aktion zunächst die Bereitschafts- und Fähigkeitsbeanspruchungen berechnet, um dann zusammen mit der Ermüdung alle Eingangsgrößen zur Bestimmung des aktuellen Leistungsangebots zu kennen. Die Dauer der Aktivität ergibt sich dann als Quotient aus dem Aufwand der Tätigkeit und dem aktuellen Leistungsangebot der Arbeitskraft.

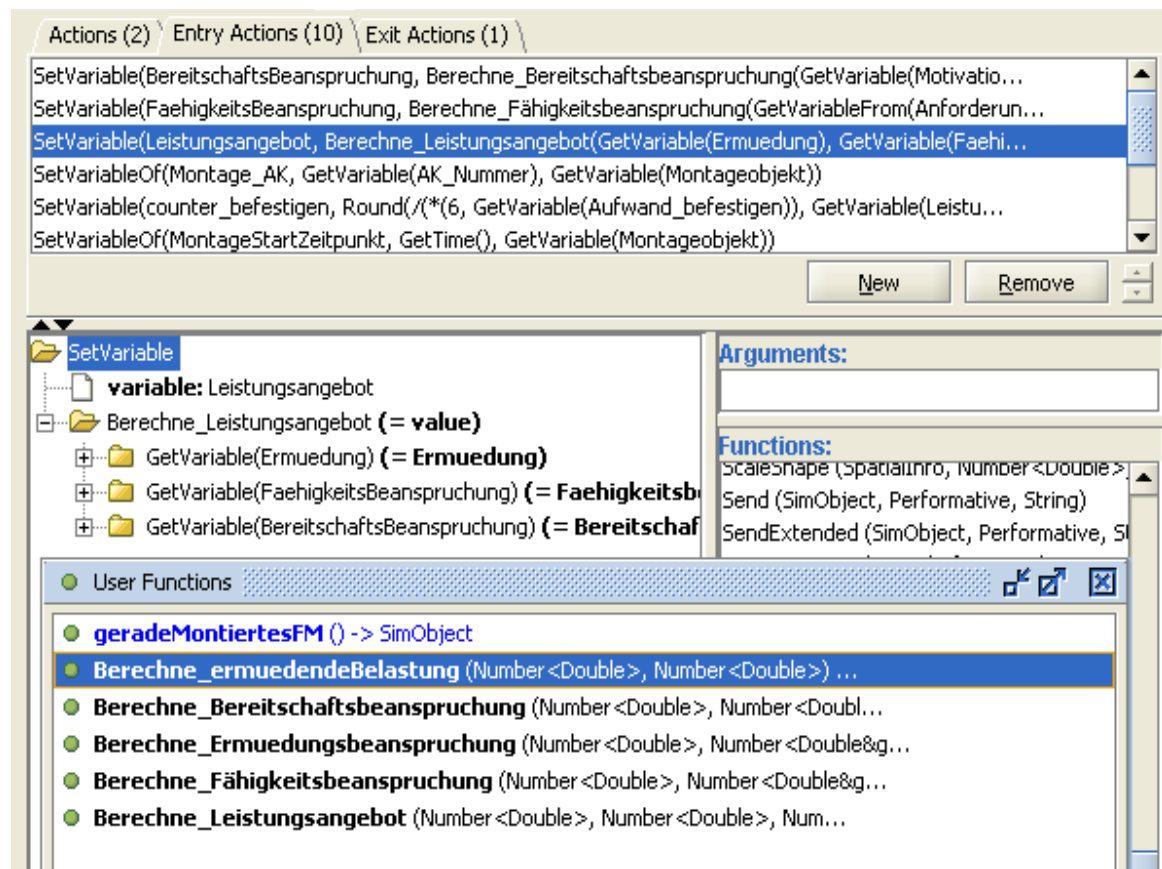


Abbildung 40: Funktionen zur Bestimmung der ergonomischen Parameter in SeSAM

4.4.5 Erweiterung des Aktivitätsdiagramms

Neben den in Abschnitt 4.4.1 beschriebenen produktiven Tätigkeiten der Arbeitskräfte auf einer Baustelle sollen auch Pausen und Zusatztätigkeiten im Aktivitätsdiagramm der Agentenklassen berücksichtigt werden. Hierzu wird zum einen auf die Ermüdung und das Erholtempo der Arbeitskräfte zurückgegriffen und zum anderen die Wahrscheinlichkeit und Dauer der Zusatztätigkeiten festgelegt.

4.4.5.1 Spezifikation von Pausen- und Zusatztätigkeiten

Im Rahmen seiner Tätigkeiten durchläuft ein Agent sich wiederholende Aktivitätsabfolgen. Der produktive Grundzyklus wird in Abschnitt 4.4.1 dargestellt und hier um Aktivitäten zur Abbildung von Erholpausen und Zusatztätigkeiten ergänzt. Dazu ist es zunächst erforderlich, nach Abschluss jedes produktiven Grundzyklus zu prüfen, ob eine Erholpause oder eine Zusatzaktivität ausgeführt werden soll. Ist dies nicht der Fall bzw. ist die Zusatztätigkeit erledigt und die Arbeitskraft erholt,

beginnt der produktive Grundzyklus von vorne. Ein UML-Aktivitätsdiagramm stellt diese Spezifikation des Agentenverhaltens in Abbildung 41 graphisch dar.

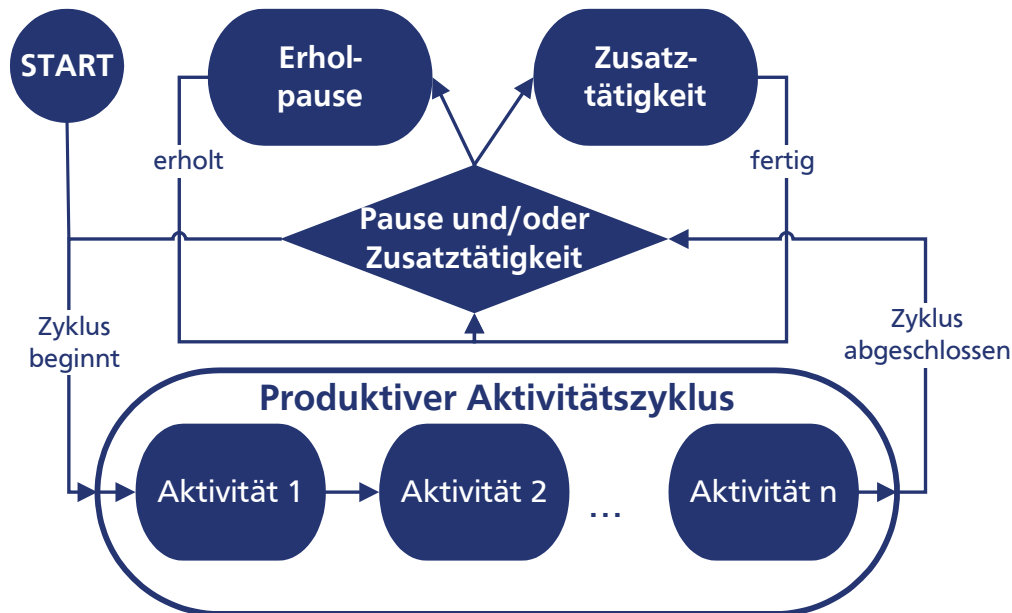


Abbildung 41 : Ergänzung des Grundzyklus um Erholpausen und Zusatztätigkeiten

Als Parameter sind sowohl für die Zusatztätigkeit als auch für die Erholpause Zustandsvariablen zur Beeinflussung der Dauer und Eintrittswahrscheinlichkeit vorzusehen, die dann mit Werten belegt und justiert werden können.

4.4.5.2 Implementierung der zusätzlichen Aktivitäten

Die Implementierung der Aktivitäten „Erholpause“ und „Zusatztätigkeit“ orientiert sich an der programmtechnischen Modellierung der produktiven Aktivitäten. Beide haben als zentrale Aktion eine negative Inkrementierung, die entweder einen Counter entsprechend der Dauer der Zusatztätigkeit verändert oder die Ermüdung der Arbeitskraft um den Erholwert reduziert, bis in beiden Fällen der Wert ‚0‘ erreicht wird.

Die vorgeschaltete Entscheidungsaktivität und der Zirkelschluss der beiden zusätzlichen Aktivitäten ermöglicht es, dass entweder keine oder eine oder beide zusätzlichen Aktivitäten ausgeführt werden, bevor ein neuer Grundzyklus beginnt.

4.5 Qualitätssicherung bei der Aufstellung eines baubetrieblichen Multiagentenmodells

Die Glaubwürdigkeit und Gültigkeit eines Simulationsmodells ist für seinen Einsatz als Planungswerkzeug, das Vorgabewerte für Bauprozesse generiert, von zentraler Bedeutung. Da ein vollständiger Beweis der Richtigkeit eines Modells praktisch nicht möglich ist, hat die systematische Umsetzung der Qualitätssicherung einen umso höheren Stellenwert.¹⁹⁹

Die wichtigsten Anforderungen an die Qualität eines Simulationsmodells sind die Plausibilität und Genauigkeit der Simulationsergebnisse. Um dies zu erreichen, werden verschiedene Tests zur Validierung und Verifikation des Multiagentenmodells des Bauablaufs eingesetzt. Sie dienen der Überprüfung, ob die Modelltransformationen korrekt erfolgt sind und ob das Modell in der Lage ist, das Verhalten des realen Systems hinreichend genau abzubilden.

Die allgemeinen Grundlagen zur Validierung und Verifikation von Simulationsmodellen findet sich in Abschnitt 2.1.1.3. Im Folgenden wird dargestellt, welche Tests besonders gut für die Überprüfung eines Multiagentenmodells des Bauablaufs geeignet sind. Zunächst werden Techniken beschrieben, die während der Modellbildung intuitiv eingesetzt werden können. Sie dienen der kontinuierlichen Qualitätssicherung und zielen meist auf die allgemeine Plausibilität des Modellverhaltens während des Simulationsexperiments ab. Danach werden Tests zur Überprüfung des fertigen und lauffähigen Multiagentenmodells hinsichtlich seiner Plausibilität im Detail und der Übereinstimmung der Simulationsergebnisse mit der Realität erläutert.

4.5.1 Kontinuierliche Qualitätssicherung bei der agentenbasierten Modellierung des Bauablaufs

Die Überprüfung der Qualität des Modells muss während aller Phasen des Vorgehensmodells erfolgen, um die Entstehung von Fehlern oder zumindest deren Fortpflanzung zu minimieren, wobei die Definition eines Vorgehensmodells selbst schon eine Methode zur Sicherung der Qualität ist. Denn durch die Vorgabe einer Folge von Arbeitsschritten und deren Inhalt lässt sich deren Erfolg im Einzelnen überprüfen, und die Wahrscheinlichkeit von Fehlern wird reduziert.

¹⁹⁹ Vgl. Wenzel et al. (2008): Qualitätskriterien der Simulation, S. 2 ff.

Zur Verifikation der Übergänge zwischen den nicht-lauffähigen Modellen dienen Reviews, also Begutachtungen der Modelle durch Experten. Dabei soll geprüft werden, ob die Elemente und Zusammenhänge des Eingangsmodells korrekt in das neue Modell überführt wurden. Dazu können Listen mit Modellinhalten verglichen oder numerische Zusammenhänge berechnet und gegenübergestellt werden.

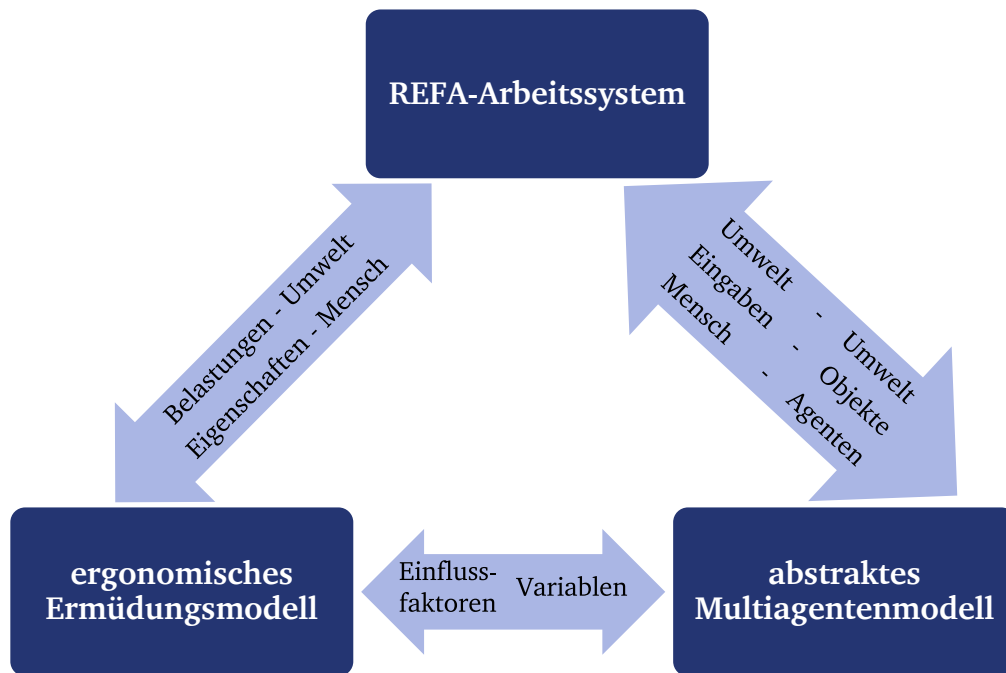


Abbildung 42: Zusammenhänge der abstrakten Modelle für ein agentenbasiertes Bauablaufmodell als Basis zur Verifikation

Die im Rahmen einer Verifikation mit Reviews zu testenden Zusammenhänge zwischen den drei abstrakten Teilmodellen sind in Abbildung 42 abgebildet. Zwischen dem REFA-Arbeitssystem und dem ergonomischen Leistungs-Ermüdungsmodell sind die Einflüsse der Belastungen aus der Umwelt und der Arbeitsaufgabe sowie der Eigenschaften der Arbeitskräfte auf den Bauablauf abzugleichen. Vom REFA-Arbeitssystem werden im abstrakten Multiagentenmodell die Umwelt, die Eingaben und die Menschen sowie deren Betriebsmittel abgebildet. Die Einflussfaktoren des ergonomischen Modells finden sich im agentenbasierten Modell in Form von Variablen. Nur wenn diese Zusammenhänge in allen Modellen konsistent wiedergegeben werden, ist eine Implementierung möglich, die präzise Simulationsergebnisse erlaubt.

Bereits im Laufe der Implementierung des lauffähigen Modells können dessen Teilaspekte auf Plausibilität getestet werden. Hierzu ist es in SeSAM möglich, das Verhalten der Agenten während der Simulationsexperimente zu animieren und

den Verlauf einzelner Variablen in Graphen zu verfolgen. Somit kann der Modellierer direkt die Auswirkungen von Änderungen im lauffähigen Multiagentenmodell verfolgen, um die Vorgaben zum Verhalten der Agenten sowie der Umwelt gegebenenfalls anpassen und Fehler korrigieren zu können.

Der Ablauf einer Plausibilitätsprüfung kann anhand der in Abbildung 43 dargestellten unterschiedlichen Ermüdungsverläufe einer Arbeitskraft erläutert werden. Die erste Kurve stellt eine konstante und sich regelmäßig wiederholende Abfolge von Tätigkeiten mit Ermüdungsbeanspruchung und die darauffolgende Erholpause dar. Bei der zweiten Kurve folgen stets eine Tätigkeit mit hoher Ermüdungsbeanspruchung, eine Tätigkeit mit niedriger Ermüdungsbeanspruchung und eine Erholpause aufeinander. Und bei der dritten Kurve folgt auf die ermüdende Tätigkeit in zufälligen Abständen eine Erholpause. Entsprechend den realen Gegebenheiten sollte das Simulationsmodell im Experiment den entsprechenden zeitlichen Verlauf für die Ermüdungsvariable eines Agenten erzeugen. Ist dies nicht der Fall, so muss die Modellierung schrittweise auf Fehler untersucht werden.

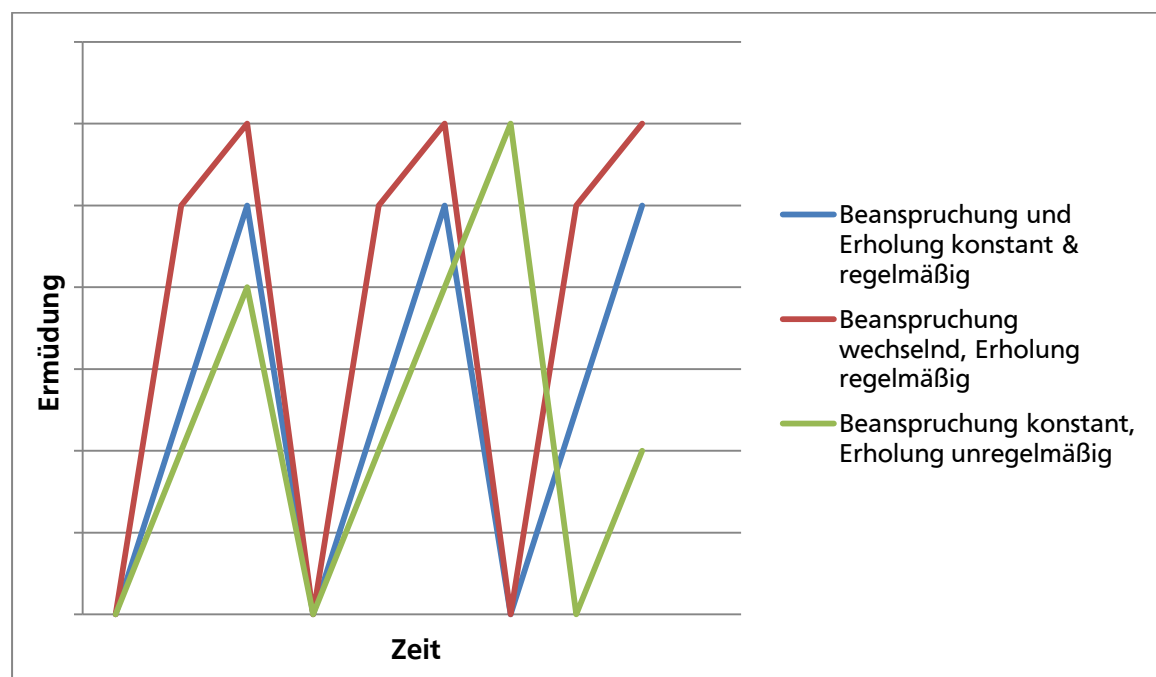


Abbildung 43: Verlauf der Ermüdung infolge Beanspruchung und Erholpausen

Man erkennt also eine Reihe von Aspekten des Modells, die sich in der Ermüdungskurve widerspiegeln und die daher mit Hilfe der Darstellung des zeitlichen Verlaufs einer Variable während des Simulationsexperiments auf Plausibilität getestet werden können.

4.5.2 Sensitivitätsanalyse des agentenbasierten Bauablaufmodells

Die Sensitivitätsanalyse des lauffähigen Multiagentenmodells des Bauablaufs orientiert sich an der gewünschten Beeinflussung der Gesamtdauer. Damit wird zum einen die korrekte Implementierung der abstrakten Modelle verifiziert und zum anderen auch nachgewiesen, dass diese valide sind und zum Verhalten des realen Systems passen.

Bei der Umsetzung der Sensitivitätsanalyse werden die Zusammenhänge der einzelnen Parameter untereinander formuliert und hinsichtlich ihrer Auswirkung auf die Gesamtdauer des Bauablaufs bewertet. Die Abhängigkeiten der Parameter untereinander sind als Checkliste bei der Durchsicht des implementierten Modells zu verstehen. Die Auswirkung auf die Gesamtdauer lassen sich dagegen mit geringem Aufwand durch Experimente testen. Hierzu wird jeweils ein Parameter des Szenarios verändert und die resultierende Gesamtdauer im Experiment bestimmt.

Im vorliegenden Fall ist dieser Test insbesondere für die Formulierung des ergonomischen Leistungs-Ermüdungsmodells von Bedeutung. Bei komplexen Modellen mit einer Vielzahl an Gewerken können aber auch deren Wechselbeziehungen auf diese Art und Weise auf Plausibilität geprüft werden. Beispielsweise können längere Ausschulfristen oder zusätzliche technologische Abhängigkeiten zu einer Verlängerung der Bauzeit führen.

Einen Überblick zu den Variablen des Multiagentenmodells, die hinsichtlich ihrer Auswirkung auf die Gesamtdauer zu untersuchen sind, gibt Tabelle 8. Dabei sind diejenigen Variablen, die als Eingangswerte in das Szenario einfließen, mit einem * markiert. Die anderen Variablen berechnen sich dann über die in Kapitel 4.3 dargestellten Zusammenhänge aus den Eingangswerten.

Variablen mit Einfluss auf Dauer	zugehörige Entität	hat Einfluss auf	Einfluss auf Dauer
Aufwand_befestigen*	Arbeitskraft	counter_befestigen, counter montieren	proportional
koerperliche Belastbarkeit*	Arbeitskraft	Ermuedungsbeanspruchung	anti-proportional
Einarbeitung*	Arbeitskraft	Fähigkeitsbeanspruchung	anti-proportional
Qualifikation*	Arbeitskraft	Fähigkeitsbeanspruchung	anti-proportional
Lernfortschritt*	Arbeitskraft	Fähigkeitsbeanspruchung	proportional
Motivation*	Arbeitskraft	Bereitschaftsbeanspruchung	anti-proportional

Variablen mit Einfluss auf Dauer	zugehörige Entität	hat Einfluss auf	Einfluss auf Dauer
Ermuedungsbeanspruchung	Arbeitskraft	Ermuedung	proportional
Fähigkeitsbeanspruchung	Arbeitskraft	Leistungsangebot	proportional
Bereitschaftsbeanspruchung	Arbeitskraft	Leistungsangebot	proportional
Erholungswert_e*	Arbeitskraft	Ermuedung	anti-proportional
Pausenwert_p*	Arbeitskraft	<i>Pausenwahrscheinlichkeit</i>	
Ermuedung	Arbeitskraft	Leistungsangebot, Pausendauer	proportional
Leistungsangebot	Arbeitskraft	counter_befestigen, counter montieren	anti-proportional
Pausendauer	Arbeitskraft	Gesamtdauer	proportional
counter_befestigen, counter montieren	Arbeitskraft	Gesamtdauer	proportional
maxTemperatur*	Umwelt	Temperatur	unterschiedlich
Temperatur	Umwelt	Ermuedungsbeanspruchung	unterschiedlich
Faktor_k-Ermuedung*	Umwelt	Leistungsangebot	proportional
Faktor_j-Leistung*	Umwelt	Leistungsangebot	proportional
Uhrzeit_Stunde	Umwelt	Bereitschaftsbeanspruchung	unterschiedlich
Teilbelastung ArbAufg-Befest*	Fertigteil	Ermuedungsbeanspruchung	proportional
Teilbelastung ArbAufg-Mont*	Fertigteil	Ermuedungsbeanspruchung	proportional
Teilbelastung Transport*	Fertigteil	Ermuedungsbeanspruchung	proportional
Anforderungen-Qualifikation*	Fertigteil	Fähigkeitsbeanspruchung	proportional

Tabelle 8: Übersicht der Modellvariablen zur Sensitivitätsanalyse

Über den Test ergonomischer Parameter bei konstanter Agentenanzahl hinaus ist auch eine Sensitivitätsanalyse hinsichtlich der Ressourcenanzahl möglich, wobei i.d.R. bei zusätzlichen Ressourcen ein Leistungsanstieg und damit eine Verkürzung der Gesamtdauer zu erwarten ist. Hier ist aber auch eine Stagnation möglich, wenn verschiedene Ressourcen einander gegenseitig beeinflussen und die

zusätzlichen Ressourcen nicht eingesetzt werden können, da an anderer Stelle ein Engpass existiert.

4.5.3 Verifikation und Validierung des agentenbasierten Bauablaufmodells

Im Rahmen der Verifikation und Validierung ist es notwendig, eine Vielzahl an Parametern der Entitäten des Multiagentenmodells zu justieren. Nur so ist es möglich, den Ablauf der Bauprozesse hinreichend genau wiederzugeben. Der Justierung liegt dabei ein Vergleichstest zugrunde, bei dem die Ergebnisse der Multiagentensimulation des Bauablaufs mit den Werten einer herkömmlichen Termin- und Ressourcenplanung im Baubetrieb verglichen werden.

Als Eingangsparameter dienen zum einen die ergonomischen Belastungen und Eigenschaften, zum anderen aber auch Aufwands- und Leistungswerte oder Grundzeiten der zu simulierenden Leistungserstellungsprozesse. Die Justierung des Modells hinsichtlich dieser Parameter erfolgt in drei Stufen. In der ersten Stufe wird die Beanspruchung auf ein Nullniveau gesetzt, so dass das Leistungsangebot nicht durch Beanspruchungen aus der Arbeitsaufgabe oder Umwelt beeinflusst wird. Dadurch kann die korrekte Modellierung der Grundzeiten überprüft und z.B. die Dauer von Kommunikations- und Transportprozessen ermittelt werden. Die zweite Stufe betrachtet das Modell mit den üblicherweise zu erwartenden Beanspruchungen und dient der Justierung der Parameter zur Ermüdung und Erholung der Arbeitskräfte. Bei der dritten Stufe geht es darum, die Simulationsergebnisse bei extremen Beanspruchungen zu validieren und zu verifizieren, indem man die verschiedenen Auswirkungen der einzelnen Extrembeanspruchungen auf das Leistungsangebot und den Verlauf der Ermüdung analysiert.

Die im Rahmen der Justierung nutzbaren Stellschrauben sind die Grundzeit für eine Tätigkeit sowie der Ermüdungs- und Leistungsfaktor und der Erholwert, wie sie in Kapitel 4.3 beschrieben sind. Die Grundzeit ist anzupassen, wenn sie nicht mit dem realen Aufwand übereinstimmt. Der Ermüdungsfaktor dient der Berechnung des Leistungsabfalls einer Arbeitskraft infolge Ermüdung, während der Leistungsfaktor die Auswirkungen aller Beanspruchungen zusammen auf die Tätigkeitsdauer bestimmt. Beide Faktoren sollen dafür sorgen, dass die Auswirkungen einer Beanspruchung auf das Leistungsangebot der Arbeitskraft korrekt wiedergegeben werden. Über den Erholwert lässt sich die Länge der Erholpausen beeinflussen, da sein Wert wiedergibt, wie schnell die Ermüdung abgebaut wird.

4.5.3.1 Ermittlung und Analyse der Tätigkeitsdauern bei minimaler Belastung

Bei der minimalen Belastung sind die fixen Eigenschaften und Belastungen der Bereitschafts- und Fähigkeitsbeanspruchung mit dem mittleren Wert von 100% identisch, so dass sich eine Beanspruchung von 0% ergibt. Die Ermüdungsbelastungen aus der Arbeitsaufgabe werden zu 0% gesetzt und die Maximaltemperatur auf 18°C festgelegt, womit eine Ermüdung der Arbeitskräfte ausgeschlossen wird. Als Belastungen bleiben damit nur die variablen Belastungen infolge des Einarbeitungseffekts und der Tagesganglinie.

Da sich die Auswirkungen des Einarbeitungseffekts und der Tagesganglinie leicht identifizieren lassen, können diese direkt überprüft werden. Die höhere Grunddauer während der ersten fünf Montagen resultiert aus der Einarbeitung. Danach bewirkt die Leistungsbereitschaft entsprechend der Tagesganglinie wiederkehrende Anstiege bei der Grunddauer. Die Auswirkungen des Einarbeitungseffekts und der Tagesganglinie auf die Montagedauer eines Elements sind in dem Diagramm in Abbildung 44 dargestellt. Rechnet man diese beiden Einflüsse aus der gesamten Montagedauer heraus, kann man direkt die Richtigkeit der Grundzeiten und ihrer Implementierung kontrollieren. Die übrige Dauer des Experiments entspricht dann der Dauer, die die Kommunikation und der Transport in Anspruch nehmen.

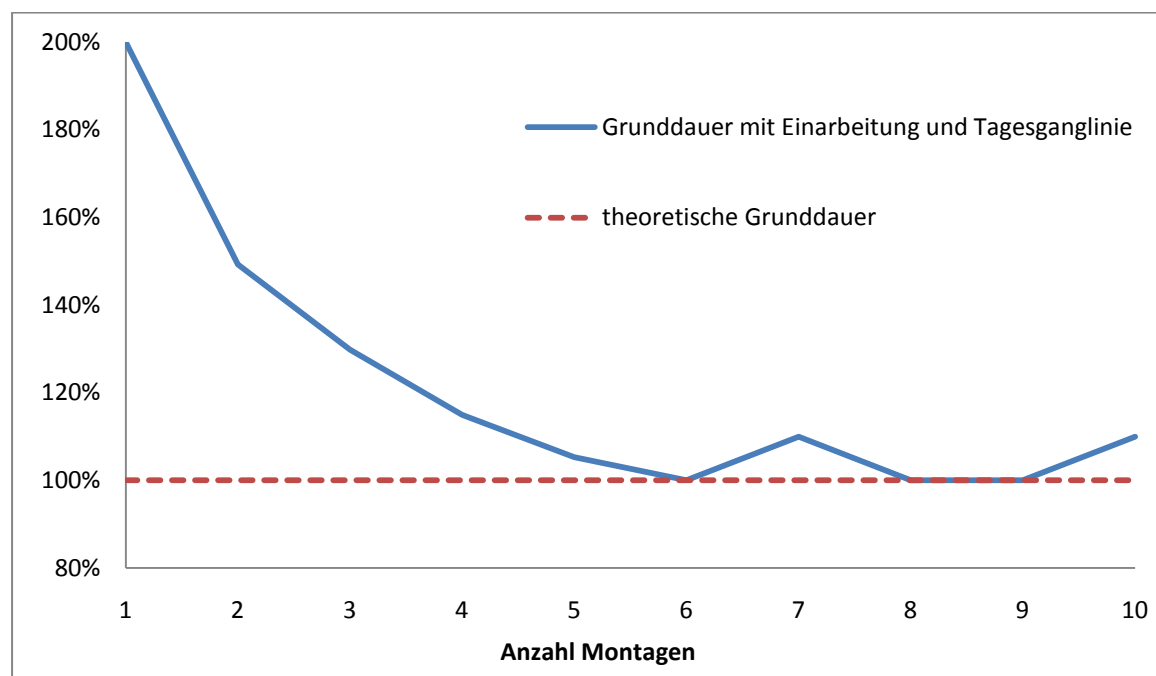


Abbildung 44: Gegenüberstellung der theoretischen Grunddauer und der Grunddauer unter Berücksichtigung des Einarbeitungseffekts und der Tagesganglinie

Durch das Wiederholen der Transport- und Montagetätigkeiten kommt es zu einer Verbesserung der Leistungsfähigkeit. Der Verlauf der Lernkurve einer Arbeitskraft für die Ausübung einer bestimmten Montagetätigkeit ist ebenfalls zu justieren. Als Parameter sind der Quotient T_1/T_e , der beschreibt, um wie viel länger die erste Montage dauert, sowie der Ablaufexponent $-b$ als Parameter des Kurvenverlaufs zu bestimmen. Wie unterschiedlicher der Verlauf des Lernfortschritts bei Variation dieser Parameter sowie der Vorerfahrung B ist, zeigt untenstehendes Diagramm in Abbildung 45. Als Standardwerte im Modell ist $T_1/T_e = 2,5$ und $-b = -0,25$ sowie $B = 0$.

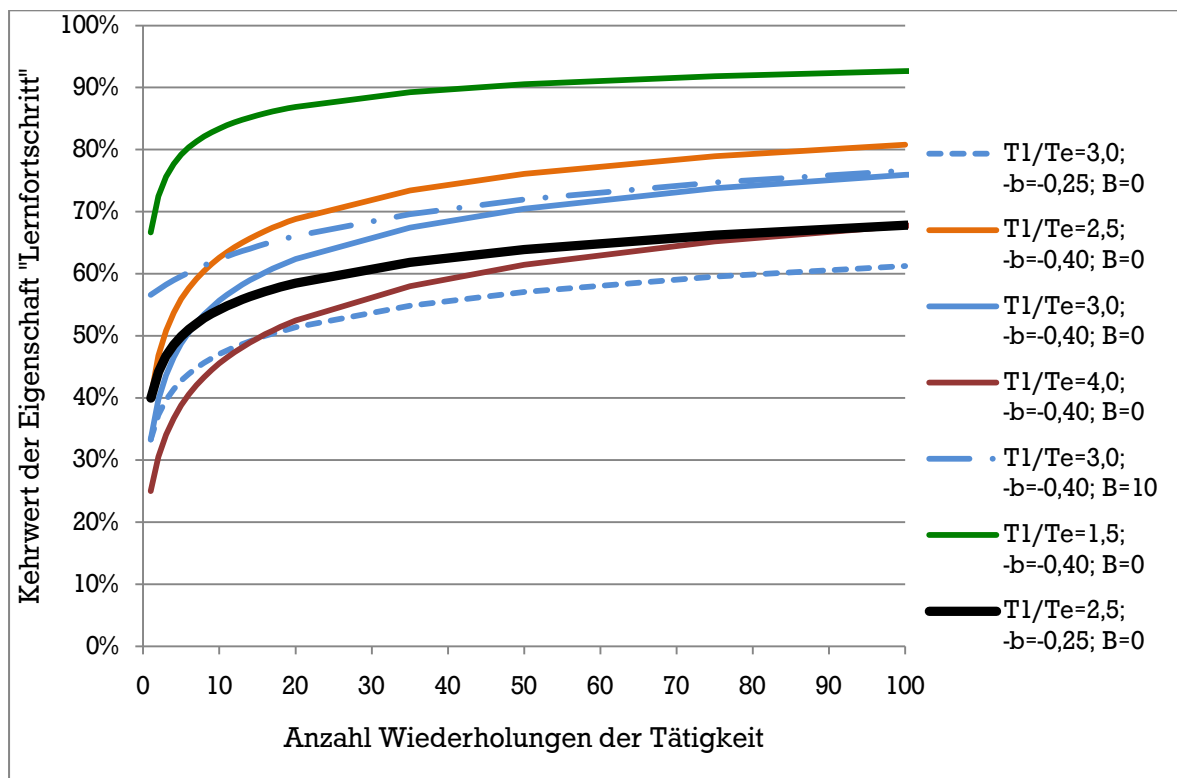


Abbildung 45: Verlauf des Lernfortschritts nach Anzahl der Tätigkeitswiederholungen bei unterschiedlichen Parametern der Lernkurve

Die Formeln zur Berechnung der einzelnen Dauern im Rahmen der Nullbeanspruchung nach herkömmlichen Methoden und zur Ermittlung der entsprechenden Dauern aus den Simulationsergebnissen sind in Tabelle 9 gegenübergestellt. Durch die Gegenüberstellung der zu erwartenden Dauern, basierend auf den erprobten Berechnungsformeln mit den Ergebnissen des Simulationsexperiments, lässt sich die Gültigkeit des zugrundeliegenden Modells überprüfen. Allerdings ist auch die gegenseitige Beeinflussung der Einarbeitungs- und Tagesgangeffekte zu beachten, so dass der Einarbeitungswert aus dem Simulationsexperiment nicht vollständig mit dem Ergebnis der Berechnungsformel übereinstimmen kann.

Dauer infolge	klassische Berechnungsformel	Ermittlung aus Simulationsexperiment
Montagegrundzeit	Grundzeit je Element \times Anzahl Elemente	Annahme entsprechend Grundzeit je Element
Einarbeitung	Grundzeit je Element \times (1+0,5+0,3+0,15+0,05)	$\sum [\Delta(\text{Montagedauer, Grundzeit})]$ der ersten fünf Elemente
Lernfortschritt	$\sum [\text{Grundzeit je Element} \times$ 1/Lernfortschritt]	$\Delta [\text{Gesamtdauer (0 Montagen), Gesamtdauer } (\infty \text{ Montagen})]$
Tagesganglinie	Grundzeit je Element $\times 0,1 \times$ Elementmontagen nach 11 Uhr	$\sum [\Delta(\text{Montagedauer, Grundzeit})]$ der übrigen Elemente
Montagedauer	Summe aus Grundzeit und Zusatzdauern	$\sum [\Delta \text{Montage (Start, Ende)}]$
Kommunikation und Transport	Gesamtdauer – Montagedauer inkl. Einarbeitung & Tagesgang- linie	Gesamtdauer – Montagedauer $\sum [\Delta(\text{MontageStart}_n, \text{Ende}_{n-1})]$

Tabelle 9: Ermittlung von Dauern mit Berechnungsformeln und aus Simulationsergebnissen

4.5.3.2 Justierung der Standardbeanspruchung

Die Standardbeanspruchung soll das Verhalten des Modells im Regelfall untersuchen, um eine Justierung der Mittelwerte der Tätigkeitsdauern und der Gesamtdauer vornehmen zu können. Hierzu kombiniert man die durchschnittlichen Eigenschaften sowie Fähigkeits- und Bereitschaftsbelastungen der Nullbeanspruchungen mit üblichen Ermüdungsbelastungen durch die Arbeitsaufgaben bei einer Tageshöchsttemperatur von 18°C. Durch die resultierenden Ermüdungsbeanspruchungen kommt es bei den Arbeitskräften zur Ermüdung, die das Leistungsangebot reduziert und Erholpausen notwendig macht. Da die übrigen Einflüsse auf die Gesamtdauer und das Leistungsangebot mit der Nullbeanspruchung identisch sind, können die Auswirkungen der Ermüdungsbeanspruchung leicht identifiziert werden.

Ein Ziel der Justierung ist es, den Anteil der Erholpausen auf 10% der Grundzeit einzustellen, da dies laut ARH-Tafeln ein üblicher Wert für Aufwandswerte bei Bauarbeiten darstellt. Die Grundzeit ist, wie oben beschrieben, bekannt, und die Pausendauer der Agenten wird als Kennzahl im Rahmen jedes Simulationsexperiments protokolliert, so dass der Erholzeit-Anteil bezüglich der Grundzeit leicht zu ermitteln ist. Durch Variation des Erholwerts, der beschreibt, um wie viel die Er-

müdung pro Minute Pause reduziert wird, ist es möglich, den Erholzeit-Anteil zu justieren. Die Simulationsergebnisse während der schrittweisen Justierung des Erholzeit-Anteils sind nachfolgend beispielhaft in dem Diagramm in Abbildung 46 dargestellt. Der grün hervorgehobene Erholwert von ‚550‘ wurde in diesem Fall als Ergebnis der Justierung in das fertige Multiagentenmodell integriert.

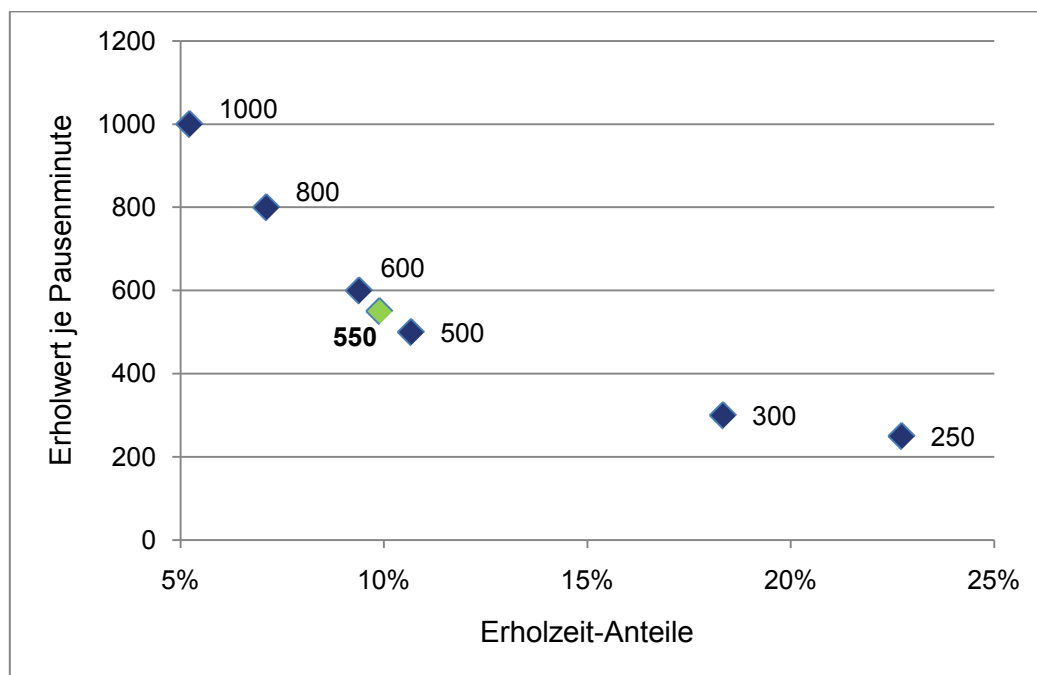


Abbildung 46: Justierung der Erholzeit-Anteile über den Erholwert des Monteurs

4.5.3.3 Validierung bei Extrembeanspruchungen

Bei der Überprüfung eines Multiagentenmodells unter Extremwerten der ergonomischen Einflussgrößen geht es in erster Linie um eine Plausibilitätsprüfung der Simulationsergebnisse. Dabei werden die qualitative Schlüssigkeit der Ergebnisse und die Nachvollziehbarkeit der zugrundeliegenden Zusammenhänge überprüft, da für die meisten Parameter keine gesicherten quantitativen Daten für Bauprozesse existieren. So wird in dem Diagramm in Abbildung 47 die Plausibilität der Ergebnisse eines korrekt implementierten Modells hinsichtlich der Aufteilung der Gesamtdauer deutlich.

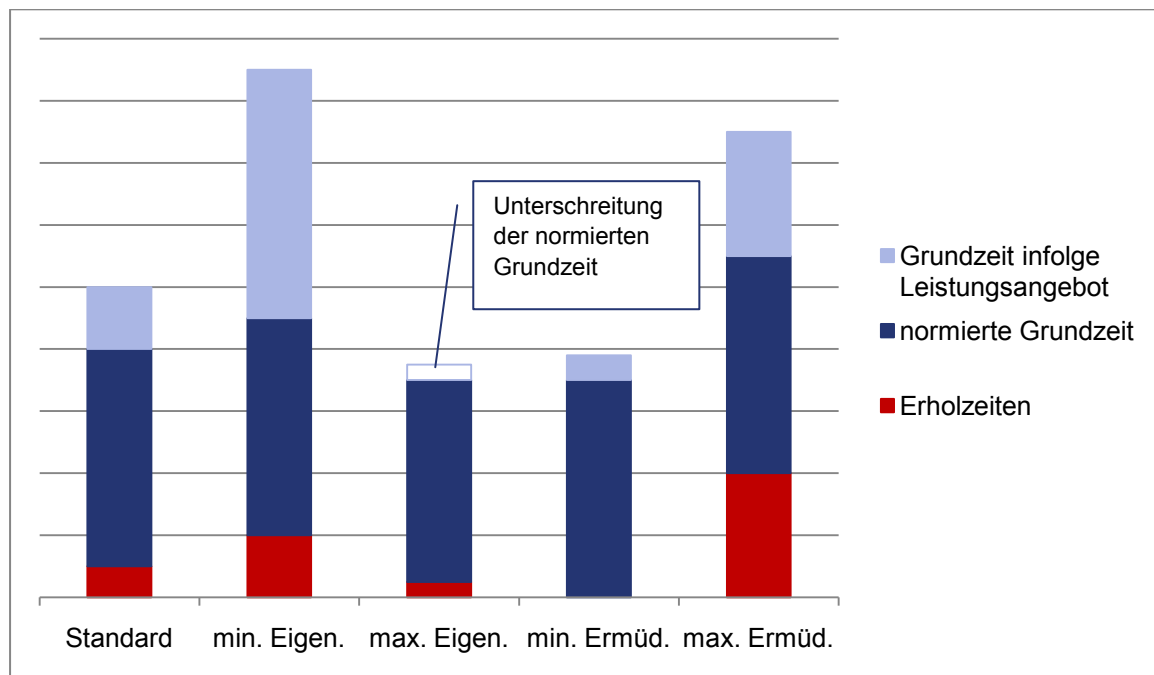


Abbildung 47: Verteilung der Bestandteile der Gesamtdauer bei verschiedenen Extremszenarien im Vergleich zu Standardbeanspruchung – ohne Verteilzeiten

Bei der durchschnittlichen Standardbeanspruchung macht die normierte Grundzeit der Montage den Großteil der Gesamtdauer aus. Die Erholzeit entspricht 10% der Grundzeit, und die tatsächliche Montagedauer ist wegen der Verringerung des Leistungsangebots durch die Effekte der Einarbeitung, der Tagesganglinie und der Ermüdung um ca. 20% höher als die Grundzeit ohne Einflüsse.

Minimiert man dagegen die Eigenschaften der Motivation und Qualifikation des Monteurs und des Transporterätführers, so steigt der Einfluss des Leistungsangebots auf die tatsächliche Montagedauer signifikant an und führt zu einer Verdoppelung der Grundmontagezeit. Durch diese längere Montagedauer erhält man interessanterweise auch einen Anstieg der Erholzeit, obwohl die Belastungen aus Arbeitsaufgabe und Temperatur gleich bleiben. Dies lässt sich dadurch erklären, dass die Arbeitskraft infolge der längeren Montagedauern auch länger den entsprechenden Belastungen ausgesetzt ist und daher stärker ermüdet. Auch die Dauer des Transports und der Kommunikation steigt leicht an, ist aber im Vergleich zu den Änderungen bei der Montagedauer fast vernachlässigbar.

Im umgekehrten Fall maximaler Motivation und Qualifikation der Arbeitskräfte sinkt die Grundzeit erwartungsgemäß unter die normierte Grundzeit, da die höhere Qualifikation und Motivation ein Leistungsangebot über 100% ermöglichen. Dies reduziert wiederum die Erholzeiten, und auch der Transport wird schneller ausgeführt. Eine Senkung der Gesamtdauer ergibt sich auch bei minimaler Ermüdungsbelastung, wobei dies insbesondere auf das vollständige Wegfallen von Er-

holpausen zurückzuführen ist, wobei die fehlende Ermüdung insgesamt auch zu einem im Diagramm erkennbar höheren Leistungsangebot führt.

Eine maximale Ermüdungsbelastung hat einen deutlichen Anstieg der Erholzeiten zur Folge, womit das Simulationsergebnis den ersten Erwartungen an das Modellverhalten entspricht. Als zweiten Effekt kann man einen Anstieg der zusätzlichen Montagedauer infolge des Leistungsangebots erkennen, der allerdings geringer ausfällt als bei minimaler Motivation und Qualifikation der Arbeitskraft. Dies lässt sich zum einen damit erklären, dass bei derart hohen Ermüdungsbelastungen öfter Pausen eingelegt werden, um die Ermüdung und damit deren Effekt auf das Leistungsangebot abzubauen. Zum anderen ist hierfür aber auch eine vereinfachte Modellannahme verantwortlich, denn die Dauer einer Tätigkeit wird immer zu deren Beginn basierend auf dem aktuellen Leistungsangebot berechnet. Dadurch kommt die Ermüdung durch die aktuelle Tätigkeit erst bei der darauffolgenden Tätigkeit in Form eines geringeren Leistungsangebots zum Tragen. Insgesamt ist das Simulationsergebnis aber als plausibel anzusehen, weshalb hier keine Änderungen notwendig erscheinen.

Die Simulationsergebnisse für die Extremwerte der Eigenschaften einer Arbeitskraft und der Belastungen infolge Arbeitsaufgabe sind, wie obenstehende Erläuterungen zeigen, plausibel und entsprechen den Vorgaben der abstrakten Modelle. Weitere Aspekte wie die körperliche und psychische Belastbarkeit der Arbeitskräfte oder der Einfluss von Qualifikationsanforderungen können in ähnlicher Form auf ihre Plausibilität geprüft werden, um das Modell zu verifizieren und validieren. Zukünftig ist die Erhebung von Daten zu den quantitativen Zusammenhängen zwischen extremen Belastungen und Eigenschaften durch ergonomische Studien anzustreben.

Im Gegensatz zur reinen Plausibilitätsprüfung der Extrembeanspruchungen mangels empirischer Vergleichswerte für die Arbeitsbelastung oder die Motivation und Qualifikation ist für die Temperaturbelastung von Arbeitskräften eine Justierung der Extremwerte basierend auf empirischen Daten möglich. Diese empirischen Daten von Fetzner sind in das Leistungs-Ermüdungsmodell eingeflossen. Deren korrekte Wiedergabe wird im lauffähigen Modell im Folgenden beispielhaft verifiziert und validiert. Hierzu wurden die Abweichungen des Aufwandswerts laut Fetzner bei der durchschnittlichen Tagestemperatur mit den entsprechenden Simulationsergebnissen verglichen. Zur Justierung wird der Faktor t eingeführt, mit dem die Temperaturbelastung der Arbeitskräfte multipliziert wird.

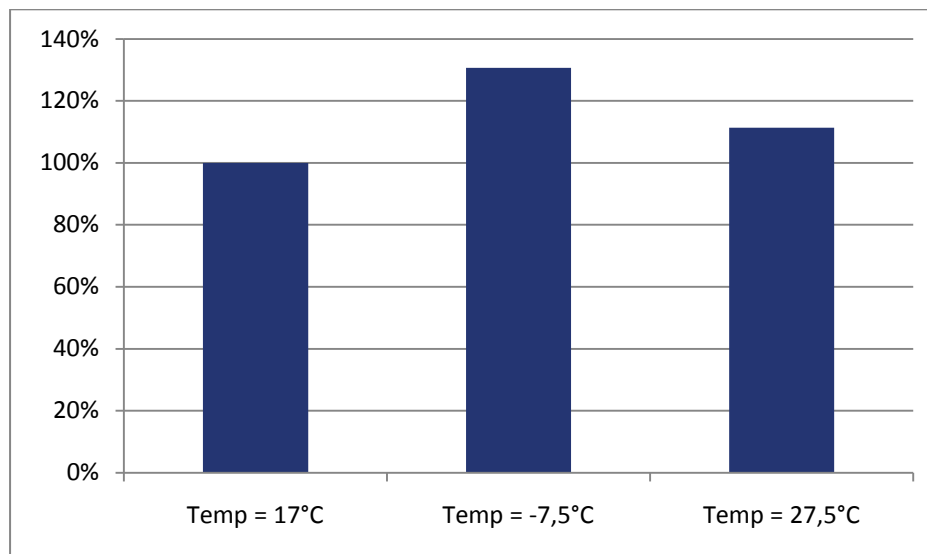


Abbildung 48: Abhängigkeit des Aufwandswerts von der Temperatur

Laut Fetzner liegt der Aufwandswert, wie in Abbildung 48 dargestellt, bei einer Temperatur von $-7,5^{\circ}\text{C}$ um 30,7% und bei $+27,5^{\circ}\text{C}$ um 11,3% höher als bei einer Temperatur von $17,5^{\circ}\text{C}$. In dieser Abweichung sind sowohl längere Erholzeiten als auch eine Abnahme des Leistungsangebots infolge Ermüdung enthalten. Der konkrete Wert für den Faktor t kann durch Variation bestimmt werden, wobei der Wertebereich iterativ eingeengt wird, bis die beste Näherung für hohe und niedrige Temperaturen erreicht wurde.

4.5.3.4 Überprüfung der Zusatztätigkeiten

Bei den Zusatztätigkeiten steht im Gegensatz zur Ermüdung und Erholung kein fundiertes Modell zur Beschreibung von Dauer und Häufigkeit zur Verfügung. Vielmehr haben baustellen-, unternehmens- und produktspezifische Aspekte Einfluss auf die ausgeführten Zusatztätigkeiten, wobei eine gute Organisation und Baustelleneinrichtung sowie ein einfach zu montierendes Bauprodukt zu einer Minimierung der Zusatztätigkeiten führt.

Als Anhaltspunkt für die Dauer der Zusatztätigkeiten kann auf die Dissertation von Haide zurückgegriffen werden, die einen Zuschlagsfaktor k_E definiert, der die sachliche Verteilzeit abbilden soll.²⁰⁰ Allerdings enthält er neben den oben genannten Aspekten auch Witterungseinflüsse und ist daher nicht direkt übertragbar. Betrachtet man nur die Spanne der Baustellenbedingungen von sehr gut bis

²⁰⁰ Vgl. Haide (2007): Quantifizierung der Einflüsse auf Vorgangsdauern, S. 54

schlecht, so ergibt sich, wie in Abbildung 49 dargestellt, ein Anteil von ca. 5-10% bezogen auf die Grundzeit, wobei dies sowohl zusätzliche Tätigkeiten als auch störungsbedingte Unterbrechungen beinhaltet. Folglich sollte bei der Aufstellung eines agentenbasierten Bauablaufmodells die Dauer und Häufigkeit der Zusatztätigkeiten anhand von Literatur- und Erfahrungswerten festgelegt werden. In den meisten Fällen wird die Dauer der Zusatztätigkeiten dabei kleiner sein als der Verteilzeitanteil von 20%, der in den ARH-Tabellen angegeben wird, da, wie in Abschnitt 4.2.2 erläutert, nur die sachlich bedingte Verteilzeit modelliert wurde. Ziel der Qualitätsprüfung für die Modellierung der Zusatztätigkeiten ist es zu überprüfen, ob die Gesamtdauer der Zusatztätigkeiten im Mittel den festgelegten Werten für Häufigkeit und Dauer entspricht.

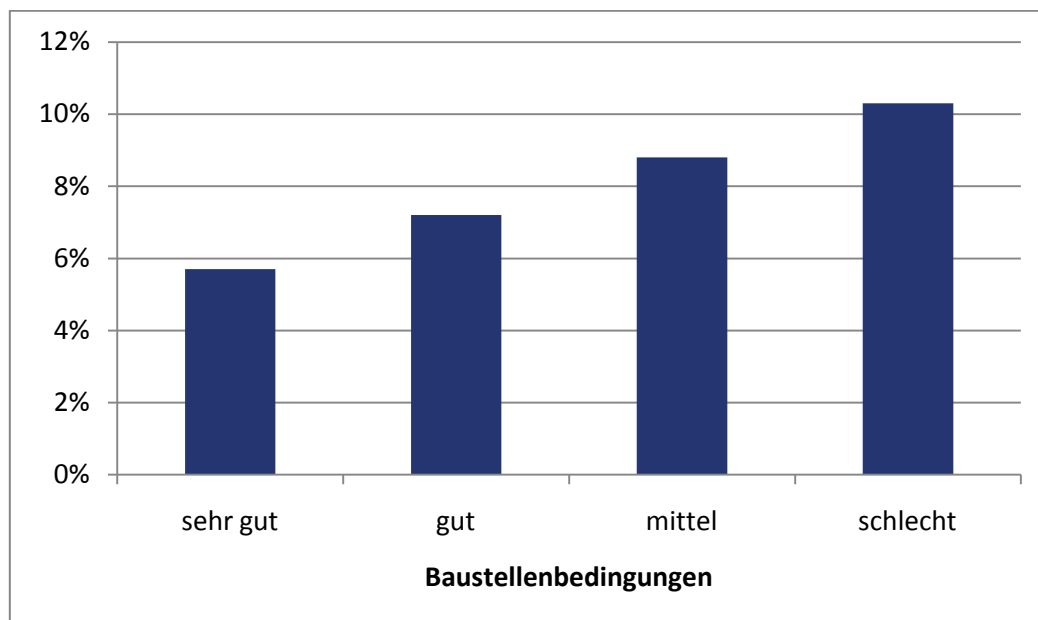


Abbildung 49: Anteil der sachlichen Verteilzeit bezogen auf die Grundzeit in Abhängigkeit von den Baustellenbedingungen²⁰¹

Zugleich ist es sinnvoll, die Auswirkungen der Zusatztätigkeiten auf die Gesamtdauer hinsichtlich ihrer Plausibilität zu überprüfen. Gibt es für einen der Agenten häufig längere Wartezeiten, so ist davon auszugehen, dass die Zusatztätigkeiten sich nicht auf die Gesamtdauer auswirken. Die Zusatztätigkeiten der Agenten, die voll ausgelastet sind, sollten sich dagegen voll auf die Gesamtdauer auswirken. Dieser Zusammenhang wird in Abbildung 50 dargestellt, wobei die Dauer der Ak-

²⁰¹ Vgl. Haide (2007): Quantifizierung der Einflüsse auf Vorgangsdauern, S. 113

tivitäten zur Aufgabenerfüllung und Erholung sowie die Zusatztätigkeiten dargestellt sind.

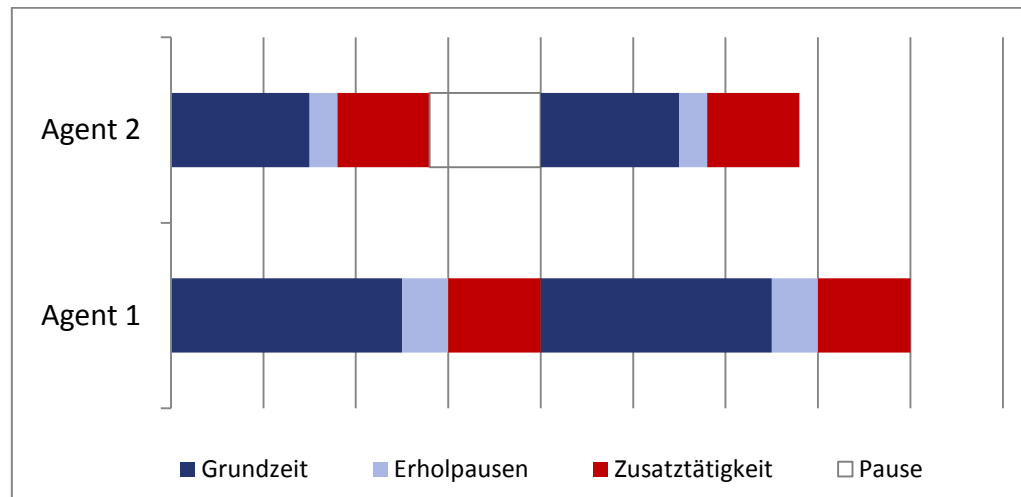


Abbildung 50: Auswirkung der Zusatztätigkeit in Abhängigkeit vom Auslastungsgrad eines Agenten

4.5.4 Fazit zur Qualitätssicherung

Das hier dargestellte schrittweise Vorgehen zur Verifikation und Validierung des Multiagentenmodells von Montageprozessen hat sich bewährt. Durch Analyse und Vergleich der Simulationsergebnisse lässt sich das Modell auf Plausibilität überprüfen und auch justieren. Die entsprechenden Methoden und Techniken existieren und konnten erfolgreich eingesetzt werden.

Durch Variation einzelner Parameter kann geprüft werden, ob sie korrekt im Kontext der zugrunde liegenden Modelle implementiert wurden. Experimente, bei denen die meisten ergonomischen Parameter ausgeblendet werden, erlauben es, Basiswerte für die weitere Verifikation und Validierung zu ermitteln. Diese kommen dann zum Einsatz, um das Modell für die Standardwerte zu justieren, wobei entsprechende Stellschrauben identifiziert oder implementiert werden müssen. Die Extremwerte werden generell auf ihre Plausibilität hin überprüft. Eine darüberhinausgehende Justierung ist möglich, wenn entsprechende empirische oder theoretische Zielgrößen bekannt sind.

Probleme bzw. Schwierigkeiten ergeben sich bei der Verifikation und Validierung aus den z.T. fehlenden Daten bezüglich der Zusammenhänge zwischen ergonomischen Einflussgrößen und Grund- bzw. Erholzeiten und Leistungsangebot. Hier ist die Durchführung ergonomischer Zeitstudien auf Baustellen erforderlich, um für die Justierung eine empirische Grundlage zu schaffen.

4.6 Entwicklung einer Ontologie zur semantischen Abbildung der Simulationsergebnisse

Die Kommunikation zwischen verschiedenen Stellen einer Projektorganisation hat für den erfolgreichen Projektverlauf stets einen hohen Stellenwert. Neben der Kommunikation zwischen menschlichen Akteuren ist auch der Daten- und Informationsaustausch unter Software-Werkzeugen von großer Bedeutung, da so die Eingabe bereits digital verfügbarer Daten durch die Nutzer vermieden werden kann.

Dies gilt insbesondere für das Controlling, bei dem Soll-Vorgaben mit Ist-Werten zu vergleichen sind, um bei Abweichungen die Schwachstellen analysieren und entsprechend steuernd eingreifen zu können. So kann mittels Verknüpfung von Simulationswerkzeugen mit Systemen zur Bauprozessdetektion und entsprechenden Controllinginstrumenten eine zeitnahe Bauprozesssteuerung implementiert werden. Hierzu ist es aber erforderlich, dass diese Verknüpfung reibungslos funktioniert und möglichst alle Informationen zwischen den einzelnen Werkzeugen ausgetauscht werden.

Um dies zu erreichen, wird am Institut für Baubetrieb der TU Darmstadt der Ansatz einer gemeinsamen Basis-Ontologie verfolgt, auf die weitere Ontologien hierarchisch aufbauen können.²⁰² Im Folgenden wird die Einordnung der entsprechenden Ontologien in die Hierarchie sowie das Modell zur Speicherung von Simulationsergebnissen in einer Ontologie und die dafür notwendige Datentransformation erläutert. Die Grundlagen zum Controlling und den systemoffenen Schnittstellen finden sich in den Abschnitten 1.2.2 und 2.2. Ergänzend wird in Kapitel 5.3 die Anwendung in Verbindung mit der Bauprozessdetektion dargestellt.

4.6.1 Einordnung innerhalb der baubetrieblichen Ontologien

Als Grundlage für den Informationsaustausch zwischen unabhängigen Software-Werkzeugen dient die baubetriebliche Basis-Ontologie. Es handelt sich dabei um eine Ontologie im Format OWL-DL, in der eine grundlegende Taxonomie baubetrieblicher Konzepte als Klassenhierarchie enthalten ist. Im Kern der Ontologie steht der Prozess im Allgemeinen und der Herstellungs- oder Leistungserstellungsprozess im Speziellen. Der Prozess wird durch eine Vielzahl anderer Klassen

²⁰² Vgl. Motzko et al (2010): Eine Ontologie für die Baubetriebswissenschaft

beschrieben, die über Properties mit dem Prozess verknüpft sind. So entsteht ein Aspekt der Aussagemächtigkeit einer Ontologie, der mit einer reinen Taxonomie niemals möglich ist. Weiterhin ermöglicht es die OWL-DL-Ontologie, den Klassen Bedingungen zuzuordnen, durch die die Klassenzugehörigkeit beschränkt wird bzw. eine automatische Zuordnung zu der jeweiligen Klasse möglich ist.

Auf der Basis-Ontologie „Baubetrieb“ bauen mittels Vererbung die spezifischen Task-Ontologien auf. Bei beiden handelt es sich um TBoxen, d.h. sie enthalten nur eine Struktur zur Ablage von Daten, die aus einer Klassenhierarchie, Properties und Bedingungen besteht. Während die Basis-Ontologie für alle Bereiche des Baubetriebs eine gültige Basis darstellt, ist die Task-Ontologie deutlich spezifischer und orientiert sich an den Informationen in Bezug auf eine bestimmte Aufgabe. Auf der TBox einer Task-Ontologie aufbauend werden in der dritten Hierarchieebene schließlich Daten in ABoxen gespeichert. Dies geschieht mittels Individuen, die einer Klasse zugeordnet sind und über deren Eigenschaften Daten beinhalten und mit anderen Individuen verknüpft werden können.

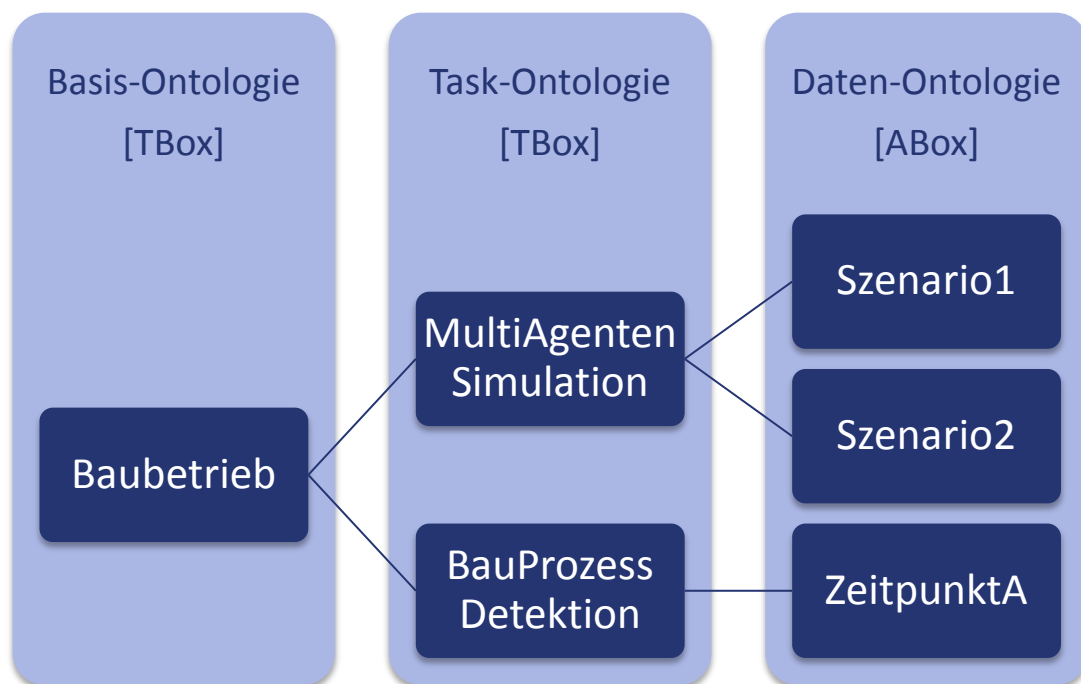


Abbildung 51: Hierarchie der Ontologien

Durch diese in Abbildung 51 dargestellte Hierarchie liegt allen Ontologien eine gemeinsame Struktur zugrunde und ermöglicht den verlustfreien Austausch von Daten bzw. Informationen, denn alle Kommunikationsteilnehmer verwenden die gleiche Struktur und kennen die gleichen Zusammenhänge zwischen den einzelnen Daten, so dass möglichst viele Informationen übertragen werden. Es bleiben ausnahmslos alle Zusammenhänge, die in der Struktur der Basis-Ontologie ange-

legt sind, erhalten, und nur die zusätzlichen Verknüpfungen der Task-Ontologie gehen verloren.

Zur Erfassung und Strukturierung möglichst aller maßgeblichen baubetrieblichen Informationen wurde der Prozess in den Mittelpunkt der Betrachtungen gestellt. Jeder Prozess besitzt demnach Ein- und Ausgaben, ihm können Termine, Bauelemente und Ressourcen zugeordnet werden, und er lässt sich in Teilprozesse gliedern bzw. ist selbst Teilprozess eines Metaprozesses. Der Leistungserstellungsprozess wird zudem über das Arbeitssystem genauer beschrieben und kann einem Ablaufabschnitt nach REFA zugeordnet werden.²⁰³

4.6.2 Terminologie einer Simulationsontologie

Die Task-Ontologie zur semantischen Speicherung der Ergebnisse der agentenbasierten Bauablaufsimulation soll alle wesentlichen Daten zusammenhängend wiedergeben und für die Auswertung sowie andere Software-Werkzeuge zur Verfügung stellen. Basierend auf der baubetrieblichen Basis-Ontologie sind hierzu Termine und Ressourcen der Prozesse zum Transport und der Montage mit den einzelnen Bauelementen sowie den herrschenden Randbedingungen zu verknüpfen.

Die Terminologie der klassischen Termin- und Ressourcenplanung orientiert sich stark an der Netzplantechnik, d.h. im Zentrum stehen Vorgänge, denen Dauern, Ressourcen, früheste und späteste Anfangs- und Endtermine sowie Pufferzeiten zugeordnet werden und die über Anordnungsbeziehungen miteinander verknüpft sind. Der Zusammenhang zwischen der Dauer eines Vorgangs und den Ressourcen ergibt sich i.d.R. aus einem Arbeitsverzeichnis, in das Aufwandswerte und Mengen entsprechend dem jeweiligen Vorgang eingehen. Dargestellt werden diese Zusammenhänge meist in Form von vernetzten Balkenplänen. Eine Verknüpfung der Vorgänge mit Bauteilen erfolgt oft lediglich über die Vorgangsbezeichnung wie z.B. „Stützen 1.OG“, wodurch für den plan- und sachkundigen menschlichen Bearbeiter eine Zuordnung des Vorgangs zum Bauteil und dem Taktabschnitt möglich ist.

Die im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Task-Ontologie erlaubt eine deutlich feinere Darstellung und besitzt eine maschinenlesbare Zuordnung der Arbeitsabläufe und deren Termine zu individuellen Bauelementen. Dies wird durch eine feingliedrige Orientierung an den Leistungserstellungsprozessen und deren Verknüpfung mit einem Bauelement erreicht. Den Leistungserstellungsprozessen sind

²⁰³ Vgl. Motzko et al (2010): Eine Ontologie für die Baubetriebswissenschaft

Anfangs- und Endtermin, Dauern sowie individuelle Arbeitskräfte und Baugeräte als Ressourcen zugeordnet. Weitere Informationen können im Arbeitssystem, das den Prozess näher beschreibt, abgelegt werden. Daneben werden dem Prozess Bauelement zugeordnet, die Informationen hinsichtlich seiner Lage, seines Typs und seiner Geometrie besitzen. Bei den Bauelementen handelt es sich hier stets um Fertigteile, deren Montage simuliert wird.

Um die veränderten Randbedingungen verschiedener Experimente in der Ontologie abzubilden, wird für jeden Datensatz eine eigene ABox erzeugt, die ein Szenario des Bauablaufs abbildet. Während die Transport- und Montageprozesse jedem Bauelement individuell zugeordnet werden, wird ein Metaprozess „Bauprojekt“ definiert, dem die Parameter des jeweiligen Szenarios zugeordnet werden. Die Struktur der Daten einer Szenario-ABox der Task-Ontologie für die Bauablaufsimulation ist im Schema der Abbildung 52 dargestellt.

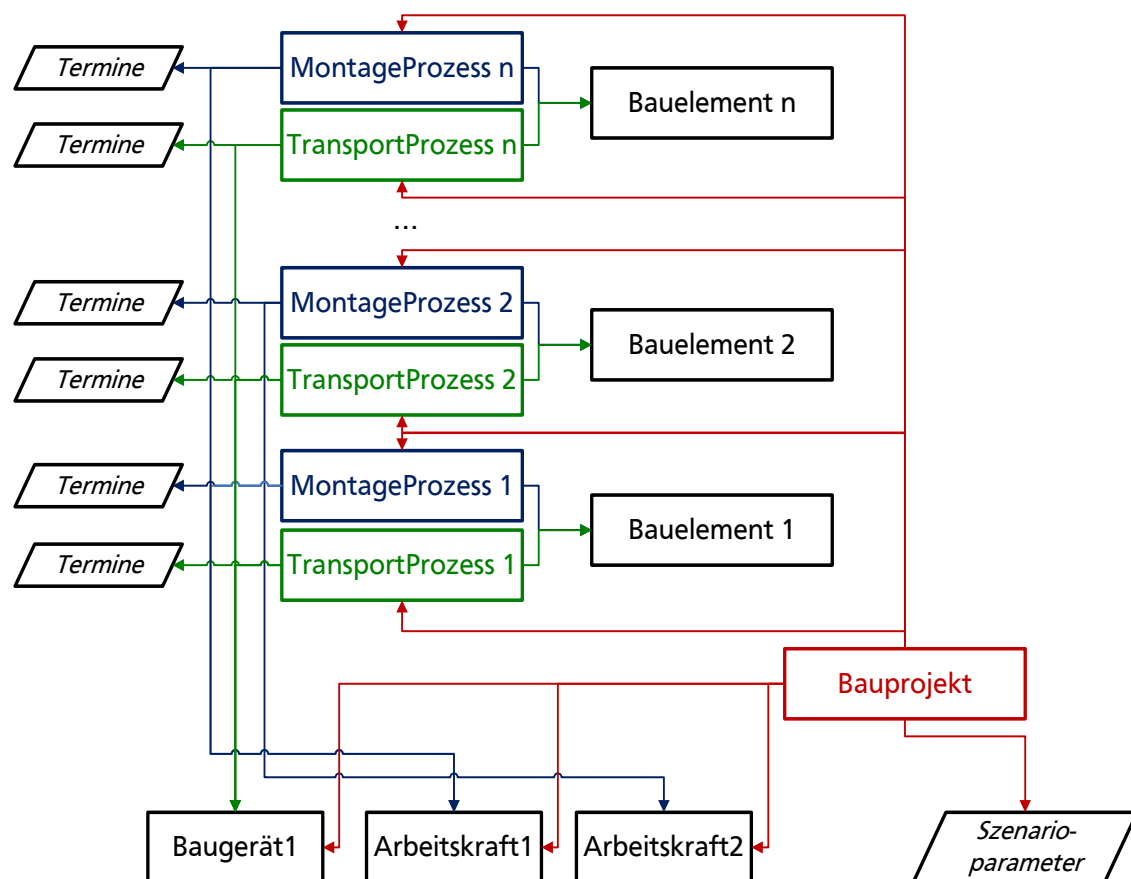


Abbildung 52: Struktur der Daten eines Szenarios in einer ABox der Task-Ontologie

Die Speicherung der ergonomischen Einflussgrößen des Szenarios erfolgt, wie in Abbildung 53 dargestellt, entsprechend der Verknüpfung des Multiagentenmodells

mit dem Leistungs-Ermüdungsmodell. Die ergonomischen Eigenschaften werden der jeweiligen Arbeitskraft zugeordnet, die Teilbelastungen der Arbeitsaufgabe und die Anforderungen an die Qualifikation der Arbeitskraft sind mit dem Bauelement verknüpft. Globale Einflüsse wie Witterung oder Tageszeit werden in der Umwelt gespeichert. Darüber hinaus werden das Leistungsangebot und die Ermüdungsbeanspruchung der Arbeitskraft bei jedem Prozess festgehalten.

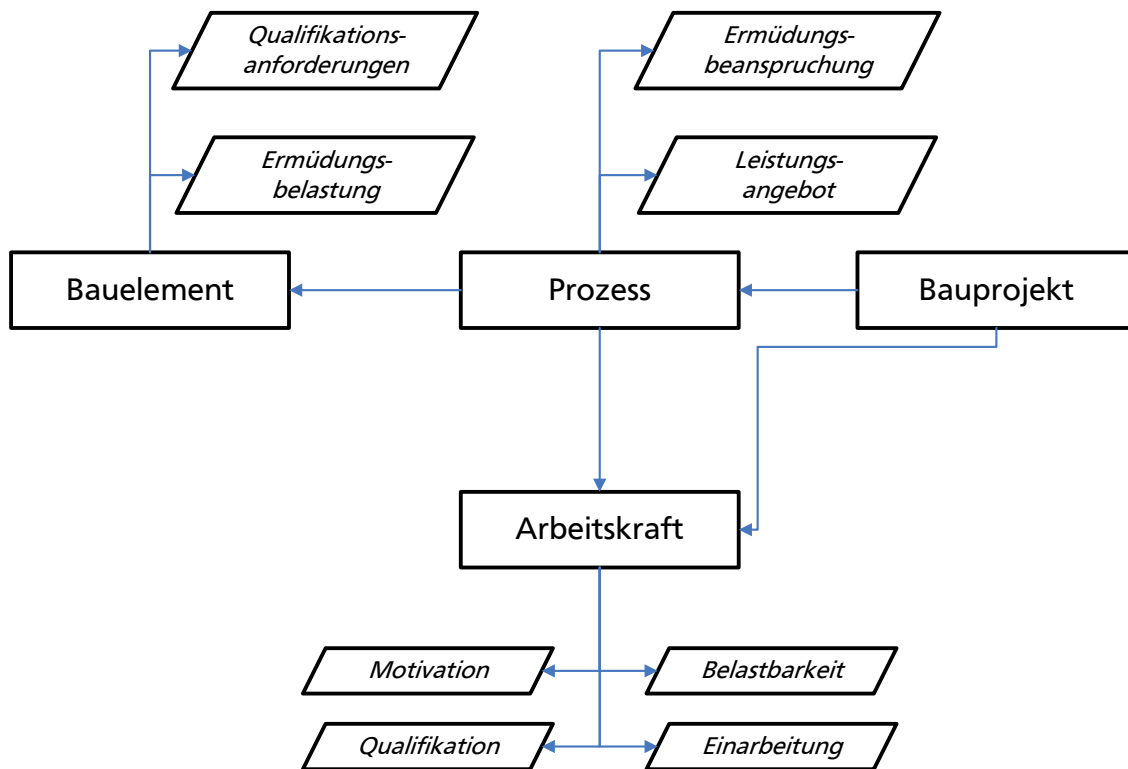


Abbildung 53: Zuordnung der ergonomischen Parameter in der Task-Ontologie

Die Unterscheidung in die TBox der Task-Ontologie und die konkreten Daten einer ABox entspricht der Trennung in Klassen und deren Instanziierung in der objektorientierten Modellierung.

4.6.3 Informationsaustausch der Simulation per Ontologie

Die Daten, die bei der Multiagentensimulation von Montageprozessen als Eingangsparameter genutzt, beziehungsweise als Simulationsergebnisse erzeugt werden, sind in Abbildung 54 dargestellt. Die Eingangsparameter bilden die Situation des Simulationsexperimentes. Soll der tatsächliche Bauablauf nachempfunden werden, so stammen die Daten beispielsweise von Baustellensensoren für die Witterung, den anfänglichen Baufortschritt oder die Ressourcenanzahl.



Abbildung 54: Eingangsparameter und Ergebnisse einer Multiagentensimulation von Montageprozessen im Bauwesen

Bei jedem Simulationsexperiment entsteht eine Vielzahl an Daten über die Bauprozesse unter bestimmten Randbedingungen. Um diese als Informationen für die weitere Verwendung bereitzustellen, wird für jedes Szenario eine ABox der Simulations-Taskontologie erzeugt. Basis hierfür sind die Ausgabedaten der Simulationssoftware, die in das OWL-Format zu transformieren sind. Der Vorteil der Speicherung der Daten in einer Ontologie-ABox liegt in der semantischen Verknüpfung durch die zugrundeliegenden TBoxen der Ontologie. Durch die maschinenlesbare Zuordnung der Daten zu Konzepten und die Beziehungen der Konzepte untereinander entstehen Informationen, die für Software-Tools nutzbar sind. Zugleich werden die Daten für eine zukünftige Nutzung dokumentiert.

Die Ausgabedaten der Multiagentensimulation in SeSAM werden als CSV-Datei zur Verfügung gestellt. Das Dateiformat CSV (Comma Separated Values) besteht aus mit Komma oder Semikolon getrennten Werten, die durch Zeilenumbrüche strukturiert werden und zusätzlich eine erläuternde Überschriftzeile erhalten können. Damit handelt es sich um schwach strukturierte Daten ohne semantische Informationen.²⁰⁴ Vorteilhaft ist aber die Möglichkeit diese Daten entsprechend ihrer Struktur weiterzuverarbeiten, z.B. in einer Tabellenkalkulation oder mittels Transformationsroutinen.

Bei den Ausgabedaten handelt es sich um Zustandsvariablen beliebiger Entitäten des Simulationsexperiments, die zu definierten Zeitpunkten während des Experiments ausgelesen werden. Ein Schema der Erzeugung und Umwandlung der Si-

²⁰⁴ Y. Shafranovich: Common Format and MIME Type for CSV Files, <http://tools.ietf.org/html/rfc4180>, Abruf: 22.10.2009

CSV-Ausgabedatei „Situation“	OWL-Ontologie-ABox
Witterung _MaxTemp	<pre> <rdf:Description rdf:about="#Temperatur_1"> <mf:hatMaxTemp rdf:datatype="http://www.w3.org/2001/XMLSchema#float">20.0 </mf:hatMaxTemp> <rdf:type rdf:resource="http://baubetrieb.ath.cx/ont/static/BaubetriebOntologie.0.1.owl#Temperatur"/> </rdf:Description> </pre>
Monteur mit Eigenschaften, Dauer des Wartens und der Pausen	<pre> <rdf:Description rdf:about="#FassadenMonteur_M1"> <rdf:type rdf:resource="http://baubetrieb.ath.cx/ont/static/BaubetriebOntologie.0.1.owl#FassadenMonteur"/> <mf:hatEigenschaft rdf:resource="#Motivation_M1"/> <mf:hatEigenschaft rdf:resource="#Qualifikation_M1"/> <bb:istRessourceFürProzess rdf:resource="#PrognoseSzenarien_1"/> <mf:hatPausendauer rdf:datatype="http://www.w3.org/2001/XMLSchema#int">1279< /mf:hatPausendauer> <mf:hatEigenschaft rdf:resource="#Belastbarkeit_M1"/> <bb:istRessourceFürProzess rdf:resource="#FassadenmodulMontageProzesse_1"/> <mf:hatWartezeit rdf:datatype="http://www.w3.org/2001/XMLSchema#int">193< /mf:hatWartezeit> </rdf:Description> </pre>
Motivation des Monteurs	<pre> <rdf:Description rdf:about="#Motivation_M1"> <rdf:type rdf:resource="http://baubetrieb.ath.cx/ont/static/ModulfassadeOntologie.1.0.owl#Motivation"/> <mf:hatWert rdf:datatype="http://www.w3.org/2001/XMLSchema#float">100. 0</mf:hatWert> </rdf:Description> </pre>

Tabelle 10: Gegenüberstellung ausgewählter Daten in der Ausgabedatei der Situation mit den zugehörigen Ontologiekonzepten

Die Daten über die Situation werden dem ‚Bauprojekt‘ entweder direkt als Datatype-Properties zugeordnet oder über Object-Properties zu Individuen der Klassen ‚Termine‘ und ‚Arbeitskräfte‘ verknüpft, die wiederum entsprechende Datatype-Properties besitzen. Es existiert also in jeder ABox ein Individuum der Klasse ‚Bauprojekt‘, dem die Tageshöchsttemperatur sowie die Anzahl der Ressourcen als Daten direkt beigelegt sind. Das Bauprojekt ist zugleich mit einem

Individuum der Klasse ‚SollEndTermin‘ und mehreren Individuen der Klasse ‚gewerblicheArbeitskräfte‘ verbunden, denen wiederum bestimmte Daten beigelegt sind.

CSV-Ausgabedatei „Bauelemente“	OWL-Ontologie-ABox
Bauelementtyp (Fertigteile)	<code><mf:hatFassadenmodulTyp rdf:datatype="http://www.w3.org/2001/XMLSchema#string"> Giebelmodul</mf:hatFassadenmodulTyp></code>
Zugehöriger Montage- prozess	<code><bb:hatHerstellprozess rdf:resource="#FassadenmodulMontageProzesse_1"/></code>
MontageStart + Montagetag	<code><rdf:Description rdf:about="#SollStartTermin_1"> <rdf:type rdf:resource="http://baubetrieb.ath.cx/ont/static/BaubetriebOnt ologie.0.1.owl#SollStarttermine"/> <bb:hatMESZDatum rdf:datatype="http://www.w3.org/2001/XMLSchema#dateTim e">2009-09-07T07:40:00</bb:hatMESZDatum> </rdf:Description></code>

Tabelle 11: Gegenüberstellung ausgewählter Daten in der Ausgabedatei der Bauelemente (Fertigteile) mit den zugehörigen Ontologiekonzepten in der ABox

Für jede Zeile der Ausgabedatei der Bauelemente wird ein solches mitsamt zugehörigem Montage- und Transportprozess in der ABox erzeugt. Dem Bauelement werden dann sein Typ, entsprechende Geometriedaten sowie die Belastungen respektive Anforderungen zugeordnet. Die mit dem Bauelement verknüpften Prozesse besitzen Daten zu dem verfügbaren Leistungsangebot und sind mit ihren Ressourcen sowie SollAnfangs- und SollEndTerminen verbunden. Da die Termine als Datatype-Property ein allgemeines Datumsformat mit dem Inhalt DD:MM:YYYY hh:mm:ss besitzen, ist eine Transformation der einzelnen CSV-Werte zu den Arbeitstagen, Stunden und Minuten eines Termins erforderlich.

4.7 Eigenschaften des ergonomiegestützten Multiagentenmodells der Bauabläufe

Als Ergebnis der in Kapitel 4 beschriebenen ersten Stufe des baubetrieblichen Vorgehensmodells entsteht ein ergonomiegestütztes Multiagentenmodell der Bauabläufe. Die Eigenschaften dieses Simulationsmodells und die sich daraus ergebenden Fähigkeiten und Einsatzmöglichkeiten sollen hier zusammengefasst respektive beschrieben werden. Zugleich können die Eigenschaften als Anforderungskatalog für ein Bauablaufmodell verstanden und zu dessen Validierung eingesetzt werden.

Für das Bauablaufmodell lassen sich vier grundlegende Eigenschaften unterscheiden, die in Abbildung 56 dargestellt werden. Jede dieser Haupteigenschaften umfasst eine Gruppe von Eigenschaften, die das Bauablaufmodell näher beschreiben.

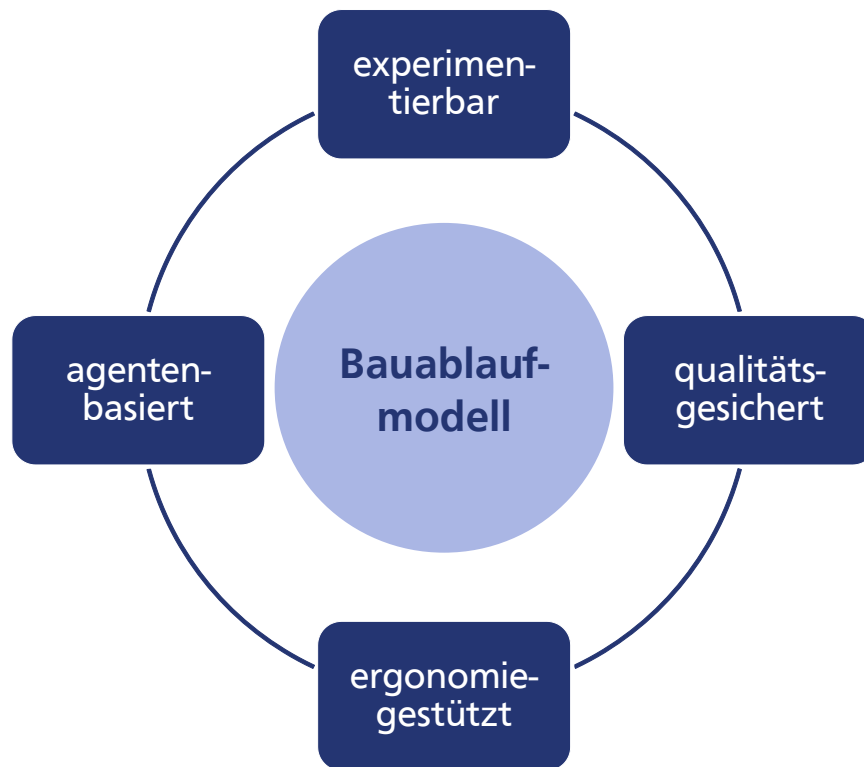


Abbildung 56: Eigenschaften eines nach der ersten Stufe des Vorgehensmodells entwickelten Modells der Bauabläufe

Die Experimentierbarkeit des Bauablaufmodells bedeutet, dass es sich um ein lauffähiges Modell handelt, das durch die Simulationsumgebung ausgeführt werden kann. Entscheidend ist dabei, dass das Modell in der Lage ist, unterschiedliche Ausgangssituationen sowie Parameterverläufe und deren Auswirkungen nachzubilden. Dadurch ist es möglich, Simulationsexperimente durchzuführen. Bei diesen kann das dynamische Verhalten des modellierten Multiagentensystems eingehend analysiert werden, und es ist zugleich möglich, das Verhalten des Gesamtsystems anhand von Kennzahlen zu bewerten.

Da das Simulationsmodell agentenbasiert ist, werden einzelne autonome agierende Individuen und passive Objekte als Entitäten in einer Umwelt abgebildet. Die Tätigkeiten der einzelnen Arbeitskräfte auf einer Baustelle und ihre Kooperation werden im Detail modelliert und ihre Wirkungen auf die Umwelt und die Objekte definiert. Dadurch ist es möglich, die kapazitiven und technologischen Abhängigkeiten der Leistungserstellungsprozesse auf einer Baustelle abzubilden. Denn eine

bestimmte Tätigkeit kann nur dann ausgeführt werden, wenn die erforderlichen Agenten respektive Arbeitskräfte verfügbar sind und wenn ein Objekt respektive Bauteil im geforderten Bauzustand und mit den notwendigen Eigenschaften vorhanden ist. Die Anwendung einer Multiagentensimulation erlaubt zudem die Abbildung eines heterogenen Raums, so dass die Geometrie der Baustelle inklusive Bauwerk und Baustelleneinrichtung abgebildet werden kann.

Das Bauablaufmodell stützt sich auf ergonomische Erkenntnisse und ist dadurch in der Lage, die Leistung der Arbeitskräfte unter Berücksichtigung ihrer individuellen Beanspruchung zu modellieren. Durch die Implementierung des baubetrieblichen Leistungs-Ermüdungsmodells wird zu jedem Zeitpunkt das Leistungsangebot einer Arbeitskraft auf Basis der ergonomischen Belastungen und Eigenschaften des arbeitenden Menschen ermittelt. Dies ermöglicht unter anderem die Einbeziehung veränderlicher Umwelteinflüsse, unterschiedlicher Anforderungen aus den Arbeitsaufgaben und die individuelle Eignung der Arbeitskräfte. Zugleich werden der zeitliche Verlauf der Ermüdung und Erholung sowie die sich daraus ergebenden Auswirkungen auf die Leistung und den Bauablauf modelliert.

Die Qualitätssicherung sorgt dafür, dass das Verhalten des Bauablaufmodells mit dem realen Bauablauf übereinstimmt. Hierfür sind Fehler bei der Erstellung und Transformation der einzelnen Modelle zu eliminieren und die Tauglichkeit des fertigen Modells für die geplante Anwendung sicherzustellen. Außerdem ist das Simulationsmodell zu justieren. Dabei wird der Bauablauf während der Simulationsexperimente mit Hilfe von Justierparametern im Simulationsmodell eingestellt, so dass er die realen Dauern bei unterschiedlichen Randbedingungen widerspiegelt.

Kapitel 5

Vorgehen bei der Anwendung der Multiagentensimulation zur Planung und Steuerung von Montageprozessen

5.1 Einsatz der agentenbasierten Simulation in der Bauindustrie

Ziel ist es, mit Hilfe der Multiagentensimulation die Planung, Kontrolle und Steuerung von Montageprozessen auf Baustellen effektiver und effizienter zu gestalten. Die Effektivität steigt, indem unterschiedlichste ergonomische Einflussfaktoren berücksichtigt werden, so dass genauere Prognosen möglich sind. Planung, Kontrolle und Steuerung werden effizienter, da vorhandene Bauablaufmodelle einfach an das jeweilige Projekt anpassbar sind und unterschiedliche Varianten des Ressourceneinsatzes selbstständig abbilden.

In der Arbeitsvorbereitung ist es mit Hilfe eines entsprechend dem in Kapitel 4 beschriebenen Vorgehen aufgestellten ergonomiegestützten Multiagentenmodell des Bauablaufs möglich, eine Vielzahl von Szenarien nachzustellen und miteinander zu vergleichen. Dies kann genutzt werden, um die Auswirkungen von Witterungseinflüssen oder Qualifikationsdefiziten abzuschätzen sowie um Engpässe in der Logistik vorherzusehen. Im Controlling liefert die ergonomiegestützte Multiagentensimulation die erforderlichen präzisen Soll-Daten für den Soll-Ist-Vergleich und ist als Hilfsmittel zur Analyse von Abweichungen einsetzbar. Außerdem dient die Multiagentensimulation der Prognose des weiteren Baufortschritts und erlaubt den Vergleich möglicher Steuerungsmaßnahmen.

Es ist erforderlich, Schnittstellen zum Datenaustausch zu schaffen, da an der Planung und Abwicklung einer Baustelle stets eine Vielzahl von Akteuren und Soft-

ware beteiligt ist. Zur Sicherstellung einer fehlerfreien, automatisierten Kommunikation ist dabei der Einsatz offener, semantischer Dateiformate mit einer breiten Nutzerakzeptanz anzustreben. Hierzu kann eine Ontologie genutzt werden, die, wie in Abschnitt 4.6 beschrieben, zusammen mit dem Multiagentenmodell zu entwickeln ist.

5.1.1 Vorgehensweise und Anwendungsfälle der Multiagentensimulation

Als Basis für den Einsatz der Multiagentensimulation in der Bauindustrie dient ein lauffähiges Multiagentenmodell, dessen Modellierung und Justierung in der ersten Stufe des Vorgehensmodells beschrieben wird. In der zweiten Stufe des im Rahmen dieser Arbeit entwickelten Vorgehensmodells wird die Anwendung der ergonomiegestützten Multiagentensimulation der Bauabläufe im Baubetrieb beschrieben. Dazu wird die Anwendung der Multiagentensimulation, wie in Abbildung 57 dargestellt, in die Planung des Bauablaufs während der Arbeitsvorbereitung sowie die Kontrolle und Steuerung der Bauausführung untergliedert. Zusätzlich umfasst das Vorgehensmodell den zugehörigen Austausch von Informationen bezüglich des Bauablaufs.

Aufbauend auf das Multiagentenmodell werden zunächst ein oder mehrere Situationen als Ausgangspunkt für die Experimente aufgestellt, wobei jeweils die Anzahl der Ressourcen sowie deren Eigenschaften und die äußeren Randbedingungen festzulegen sind. Als Ergebnis der Experimente erhält man Prognosedaten zum Bauablauf, die nach unterschiedlichen Gesichtspunkten ausgewertet und verglichen werden können.

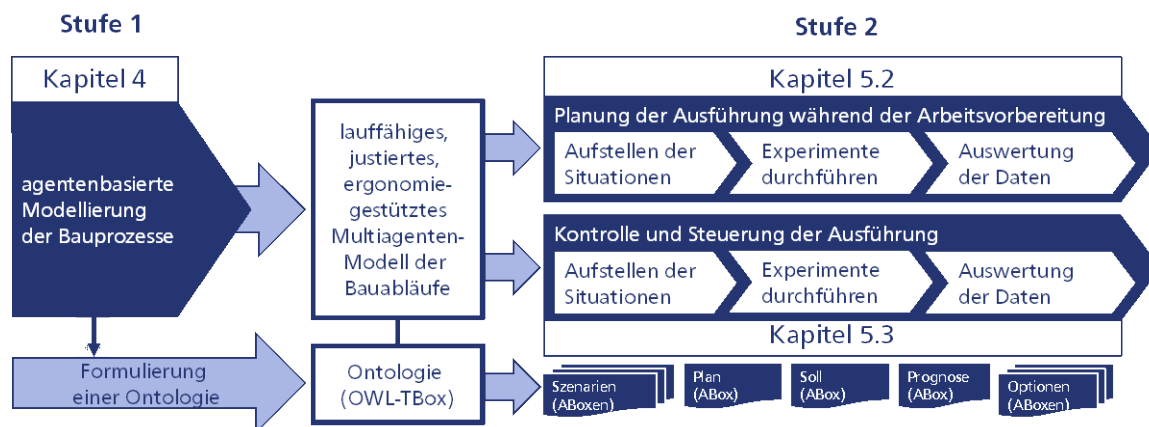


Abbildung 57: Zweite Stufe des Vorgehensmodells zur ergonomiegestützten Multiagentensimulation von Montageprozessen und des Datenaustauschs

Das beschriebene Vorgehen kommt dabei zu verschiedenen Zeitpunkten im Laufe eines Bauprojektes zum Einsatz, die hier definiert werden. Die gewonnenen Daten können für unterschiedliche Zwecke im Rahmen der Planung, Kontrolle und Steuerung des Bauablaufs verwendet werden. Wie in Abbildung 58 dargestellt, werden vor Baubeginn unterschiedliche Szenarien zum Bauablauf simuliert, um das Risiko äußerer Einflüsse abzuschätzen und durch Variation der Art und Eigenschaften der eingesetzten Ressourcen eine optimale Zusammensetzung zu ermitteln.

Im Rahmen des Controllings sind mehrere Anwendungsfälle denkbar. Zunächst liefert eine Situation basierend auf Ist-Rahmenbedingungen präzise Soll-Werte, die ggf. von den Planwerten der ursprünglich angenommenen Situation abweichen, weil beispielsweise die Witterung nicht den Annahmen entsprach oder weniger Ressourcen eingesetzt wurden. Weicht der Ist-Baufortschritt trotz der Berücksichtigung der bekannten Einflüsse vom prognostizierten Soll-Baufortschritt ab, so ist darüber hinaus eine Abweichungsanalyse erforderlich, um die unbekannten Einflüsse zu identifizieren. Neben dem Soll-Ist-Vergleich ist stets auch eine auf den aktuellen Ist-Daten basierende Prognose des Fertigstellungstermins zu erstellen. Deren Ergebnisse führen ggf. zu der Entscheidung, Steuerungsmaßnahmen zu ergreifen. Um hier die effizienteste Maßnahme zu identifizieren, ist es möglich, die Steuerungsoptionen als Ausgangssituationen für Simulationsexperimente zu erzeugen und einander gegenüberzustellen.

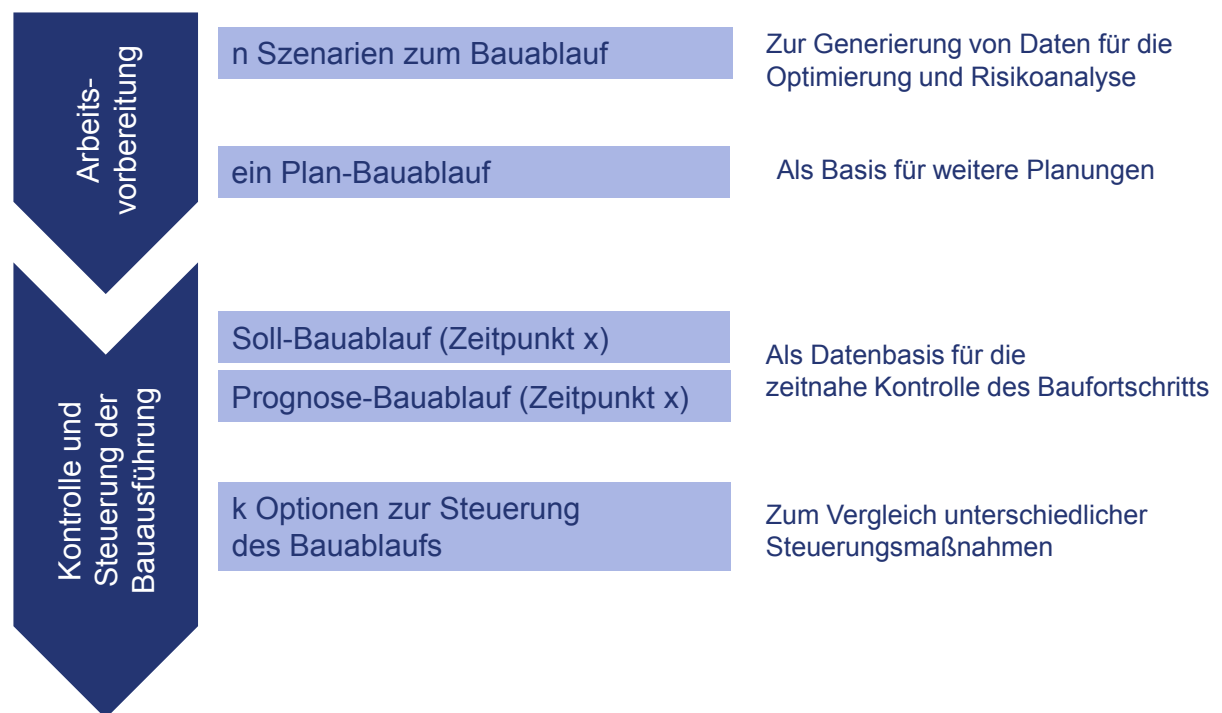


Abbildung 58: Anwendungsfälle für Simulationsexperimente gegliedert nach Zeitpunkt und Nutzung der Simulationsergebnisse

5.1.2 Standardisierung des Datenaustauschs

Ziel des Datenaustausches durch die Multiagentensimulation ist es, die Ergebnisse der Simulation Dritten mitzuteilen und selbst Ist-Daten über die Rahmenbedingungen der Baustelle, wie z.B. Ressourceneinsatz und ergonomische Einflussfaktoren, zu erhalten. Dies ist für die Implementierung eines zeitnahen Termin- und Ressourcencontrollings unerlässlich.

Zugleich erfordert ein effizientes Controlling eine größtmögliche Automatisierung des Datenaustauschs und die direkte Kommunikation von Softwaresystemen unterschiedlicher Anbieter und Anwender. In Kombination mit der stets neuen Projektorganisation ergibt sich daraus für das Austauschformat in der Bauindustrie die Forderung nach einem nicht-proprietären Datenformat, das es erlaubt, über die einheitliche Syntax hinaus auch semantische Übereinstimmung herzustellen, weshalb, wie in Kapitel 2.2 ausgeführt, Ontologien im OWL-Format verwendet werden.

Zur Differenzierung zwischen Bauablaufprognosen der Simulation im Rahmen der Arbeitsvorbereitung, vertraglich vereinbarten oder intern festgelegten Zielgrößen und auf der Baustelle erfassten Ist-Zuständen sowie darauf basierenden aktuellen Prognosen ist eine begriffliche Unterscheidung erforderlich. Denn einem einzelnen Prozess können z.B. für all diese Aspekte Termindaten zugeordnet werden. Es werden daher die in Tabelle 12 aufgeführten Präfixe definiert und den Zeitpunkten sowie dem Zweck der Simulationsexperimente zugeordnet. Die Simulationsergebnisse eines Experiments mit einem definierten Szenario werden dabei jeweils als Daten in eine separate ABox gespeichert, die ein entsprechendes Präfix erhält.

Präfix	Definition	Eingangsdaten	mögliche Quelle
Szenario	Simulationsergebnisse zum Bauablauf unter verschiedenen Randbedingungen	planmäßiger Basis-Aufwandswert; angenommene Randbedingungen	Simulation
Plan	Festlegungen des Bauablaufs basierend auf einem Szenario	planmäßiger Basis-Aufwandswert; geplante Randbedingungen	AVOR/ Vertrag
Soll	Simulationsergebnisse zum Baufortschritt basierend auf Plan- & Ist-Werten	planmäßiger Basis-Aufwandswert; tatsächliche Randbedingungen	Controlling + Simulation
Ist	Auf der Baustelle erfasste tatsächliche Situation zu einem definierten Zeitpunkt	Messwerte/ Berichtswesen	Detektion, Aufmaß
Prognose	Simulationsergebnisse für den künftigen Bauablauf mit angepassten Eingangswerten	tatsächlicher Basis-Aufwandswert; angenommene Randbedingungen	Simulation + Detektion
Option	Simulationsergebnisse zur Prognose der Auswirkungen von Steuerungsmaßnahmen	tatsächlicher Basis-Aufwandswert; geänderte Randbedingungen	Simulation, Detektion + Entscheidung

Tabelle 12: Präfixe zur Kennzeichnung von Dateien mit Simulationsergebnissen

5.2 Baubetriebliche Vorgehensweise zur agentenbasierten Bauablaufprognose in der Arbeitsvorbereitung

Das Ziel des Einsatzes der Multiagentensimulation im Rahmen der Arbeitsvorbereitung für ein Bauvorhaben ist die präzise Prognose des Baufortschritts unter definierten Randbedingungen. Hierzu werden zunächst per Experiment Prognosen für Szenarien mit unterschiedlichsten Randbedingungen erstellt, auf deren Basis dann eine Risikoabschätzung und eine Optimierung des Ressourceneinsatzes möglich sind. Dadurch ist es möglich, noch vor Beginn der Baumaßnahmen entsprechende Entscheidungen zu treffen und Planungen sowie Kostenwerte entsprechend anzupassen. Schließlich wird dann entsprechend den Entscheidungen und

der Risikobewertung der Bauablauf eines Szenarios als Planwerte festgelegt, wobei auch die zugehörigen Randbedingungen festzuhalten sind.

5.2.1 Aufstellen von Szenarien des Ressourceneinsatzes und der Baustellenrandbedingungen bei Montagearbeiten

Als Grundlage für die Simulationsexperimente wird deren Ausgangssituation definiert. Jede Situation zeichnet sich dabei durch Variation der Parameter des Simulationsmodells aus. Durch Simulationsläufe mit den Situationen des Multiagentenmodells ergeben sich Prognosen für den Baufortschritt unter den Randbedingungen verschiedener Szenarien. Zur Definition der Szenarien in der Simulationsumgebung ist es erforderlich, alle variablen Parameter auszuwählen, deren mögliche Werte festzulegen und dann automatisiert die Szenarien für alle Kombinationen zu erzeugen.

Bei den Parametern unterscheidet man solche, die innerhalb eines Bauprojektes konstant sind, von jenen, die variabel sind. Die für ein Bauvorhaben konstanten Randbedingungen sind die Gebäudegeometrie, das Baustellengelände sowie die Arbeitsaufgabe und die Belastungen, die unmittelbar aus der Erfüllung der Arbeitsaufgabe resultieren. Variable Parameter ergeben sich dabei aus der Ergonomie, dem Ressourceneinsatz sowie ggf. dem Anlieferhythmus und sind entweder durch höhere Gewalt bestimmt oder durch die Entscheidungsträger beeinflussbar. Das schrittweise Vorgehen bei der Aufstellung von Szenarien für Simulationsexperimente in der Arbeitsvorbereitung ist in Abbildung 59 dargestellt.

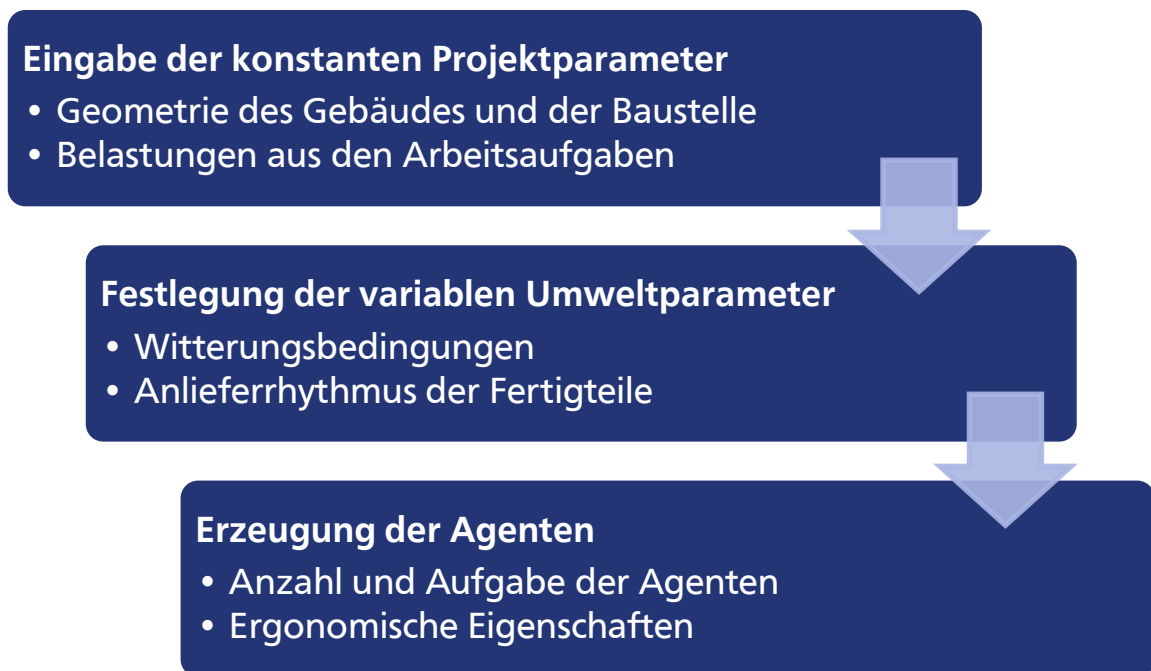


Abbildung 59: Stufenweises Vorgehen zur Aufstellung einer projektbezogenen Situation als Szenario für den Bauablauf

Bei der Aufstellung der Szenarien sind zunächst die konstanten Parameter festzulegen, um das so konkretisierte Modell als Basis verwenden zu können. Die geometrischen Größen sind dabei als räumliche Komponente der Umwelt abzubilden. Daneben sind die Belastungen aus der Arbeitsaufgabe, welche sich aus arbeitswissenschaftlichen Analysen ergeben, zu integrieren.

Im Anschluss sind die variablen Umweltparameter für jedes Szenario festzulegen. Um den Aufwand für die Erstellung der Szenarien in Grenzen zu halten, ist es sinnvoll, mehrere Gruppen von Szenarien mit identischen Umweltparametern zu definieren, die dann mit unterschiedlicher Anzahl und unterschiedlichen Typen von Agenten komplettiert werden. Als wichtigsten Umweltparameter ist die Witterung und hier wiederum die Temperatur anzusehen, da sie einen direkten Einfluss auf die Ermüdungsbelastung der Arbeitskräfte auf der Baustelle hat. Der Anlieferrhythmus wird zwar häufig als konstant bzw. bedarfsgerecht definiert, dennoch kann er als Umweltparameter auch abweichend definiert werden und hat dann ggf. einen direkten Einfluss auf die Prognose.

Als letzten Schritt zur Aufstellung eines Szenarios sind in allen Umweltszenarien die Arbeitskräfte, deren Einsatz im Rahmen der Ressourcenplanung untersucht werden soll, zu erzeugen. Die durch Agenten repräsentierten Arbeitskräfte können sich in ihrer Anzahl, ihrer Tätigkeit sowie ihren ergonomischen Eigenschaften unterscheiden. Dabei ist zu beachten, dass dem Ingenieur in der Arbeitsvorbereitung

unterschiedlich präzise Informationen über die zum Einsatz kommenden Ressourcen zu Verfügung stehen können. Die mögliche Genauigkeit der Eingabe kann daher zwischen Mittelwerten und detaillierten Mitarbeiterprofilen schwanken.

5.2.1.1 Umweltparameter für die Szenarien

Die Festlegung der Umweltparameter erfolgt basierend auf statistischen Klimadaten und dem geplanten Ausführungszeitraum. Diese ermöglichen Aussagen über die Häufigkeitsverteilung der mittleren Tagestemperatur an einem Ort für jeden Monat. Zugleich kann der Tagesverlauf der Temperatur bestimmt werden. Als Basis für die Simulationsexperimente zur Prognose des Bauablaufs unter Witterungseinflüssen werden Szenarien mit dem Mittelwert der Temperatur sowie den 5%-, 20%-, 80%- und 95%-Quantilen verwendet. Diese temperaturabhängigen Witterungsszenarien können durch zu erwartende Ausfallzeiten infolge Niederschlags oder starken Wind ergänzt werden.

alle Werte in °C		Jan	Feb	Mrz	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez	Jahr
mittlere Tagestemperatur	Mittelwert	1,5	2,5	6,4	10,1	14,7	17,8	19,8	19,5	15,2	10,4	5,5	2,7	10,5
	Standard-abweichung	5,0	4,2	3,7	4,0	3,8	3,7	3,4	3,3	3,0	3,5	3,8	4,2	7,5
	5%-Quantil	-7,7	-4,3	0,4	4,0	8,5	12,2	14,6	14,3	10,7	4,6	-0,9	-4,1	-1,6
	20%-Quantil	-2,5	-1,1	3,3	6,7	11,4	14,3	16,8	16,4	12,5	7,2	2,1	-0,6	3,6
	80%-Quantil	5,8	6,1	9,5	13,6	18,1	21,1	23,1	22,3	17,8	13,5	8,9	6,4	17,6
	95%-Quantil	9,1	9,4	12,3	17,2	21,0	23,9	25,6	25,0	20,5	15,7	11,1	9,3	22,4
TemperaturDelta morgens-mittags		2,6	4,3	5,7	6,4	6,1	5,8	6,2	7,0	6,8	5,3	3,2	2,3	5,1
TemperaturDelta mittags-mittel		1,5	2,4	3,0	3,6	3,7	2,9	2,9	3,9	3,9	3,2	1,9	1,4	3,0

Tabelle 13: Statistische Temperaturwerte für Frankfurt/Main Flughafen für den Zeitraum 1979 bis 2009²⁰⁵

Die statistischen Temperaturwerte als Basis für die Umweltparameter lassen sich aus den historischen Klimadaten des Deutschen Wetterdienstes berechnen. Beispielhaft sind in Tabelle 13 die erforderlichen Kennwerte der Temperatur für die Wetterstation am Flughafen in Frankfurt am Main zusammengefasst. Da das Simulationsmodell einen Temperaturanstieg zwischen dem Arbeitsbeginn am Morgen und den Arbeiten am Mittag beinhaltet, ist es notwendig, die Spanne des

²⁰⁵ eigene Berechnung auf Basis der Daten des DWD: Tageswerte der Station 10637, Jahre 1979 bis 2009

Temperaturanstiegs am Vormittag zu kennen. Da das Tagesmaximum meist nur kurzzeitig erreicht wird, wird als Tageshöchsttemperatur über den gesamten Nachmittag die mittlere Differenz zwischen der Temperatur am Mittag und der mittleren Tagestemperatur verwendet. Der Temperaturverlauf, der sich aus dieser Modellierung mit dem Temperatursprung um 10:00 Uhr ergibt, ist in Abbildung 60 dargestellt.

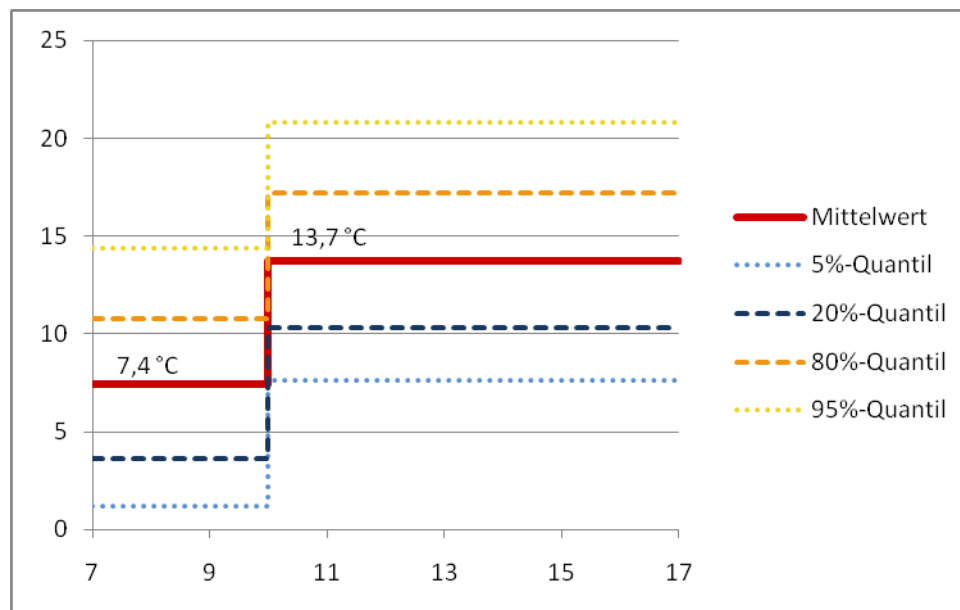


Abbildung 60: Modellierter Temperaturverlauf für den Mittelwert und vier Quantile im April

Um die Auswirkungen der Witterung und deren Eintrittswahrscheinlichkeit prognostizieren zu können, werden für jeden Monat fünf Witterungsszenarien aus statistischen Temperaturwerten entwickelt. Das Szenario mit dem Mittelwert der mittleren Temperatur ist als der Regelfall für den jeweiligen Monat anzusehen. Zusammen mit den Szenarien für das 20%- und 80%-Quantil erhält man die Schwankungsbreite der Temperatureinflüsse für die Mehrheit der zu erwartenden Witterungsbedingungen. Darüber hinaus werden die Auswirkungen von extremen Temperaturen für den jeweiligen Monat prognostiziert, indem man die 5%- und 95%-Quantil aller in den vergangenen 30 Jahren ermittelten mittleren Tagestemperaturen für die beiden übrigen Szenarien ansetzt.

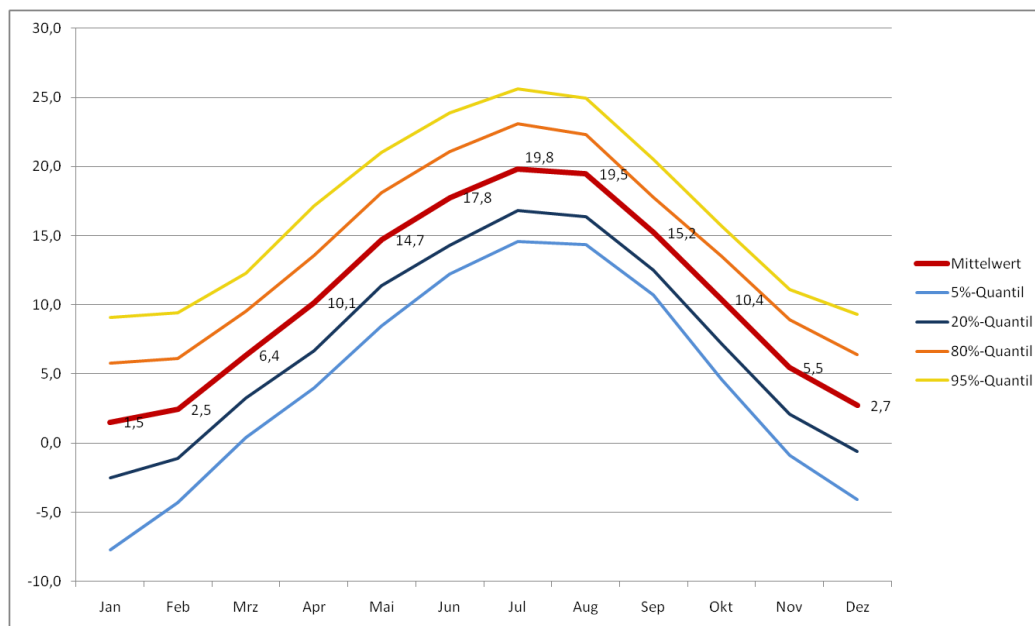


Abbildung 61: Statistische Werte der mittleren Tagestemperatur am Flughafen in Frankfurt/Main von 1979 bis 2009

Für den Fall, dass im Rahmen einer Angebotsbearbeitung noch keine genauen Ausführungstermine bekannt sind, kann es erforderlich sein, sich bei der Aufstellung der Szenarien auf Jahreswerte der Temperatur zu beziehen. In Abbildung 62 werden die deutlich größeren Differenzen zwischen dem Mittelwert und den einzelnen Quantilen der Temperaturverläufe dargestellt.

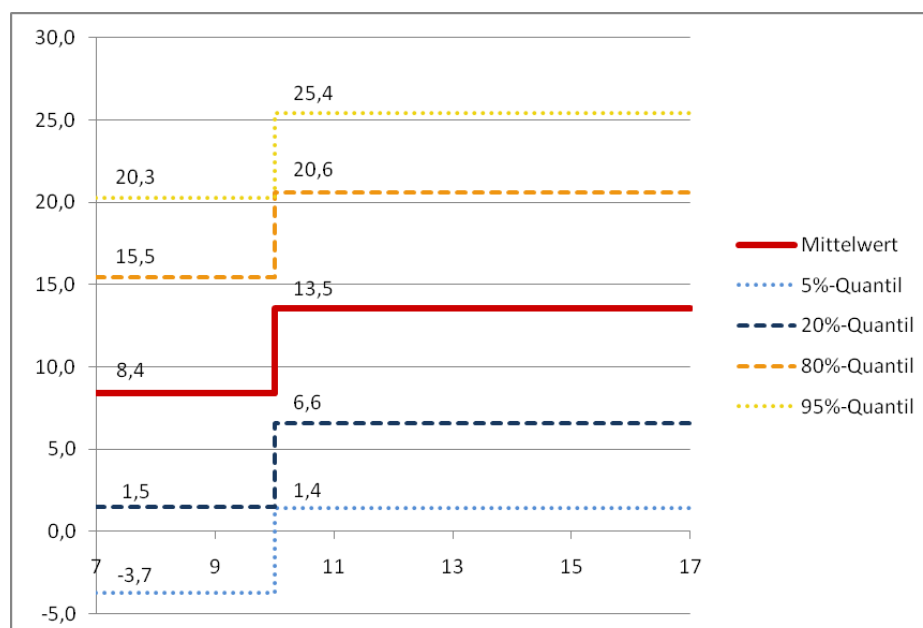


Abbildung 62: Modellierter Temperaturverlauf für den Mittelwert und vier Quantile über das gesamte Jahr

5.2.1.2 Individuelle ergonomische Eigenschaften der Arbeitskräfte

Die ergonomischen Eigenschaften einer Arbeitskraft bestimmen, welche Beanspruchung eine Arbeitskraft aufgrund der Arbeitsbelastungen erfährt. Aus dieser Beanspruchung leiten sich dann ihre Ermüdung und ihr Leistungsangebot ab. Maßgebend sind dabei sowohl die physische bzw. psychische Belastbarkeit als auch Motivation, Qualifikation sowie Lern- und Einarbeitungsfortschritt.

Die meisten dieser Werte sind von Arbeitskraft zu Arbeitskraft unterschiedlich. Bei der Aufstellung von Szenarien wäre es daher denkbar, die zu jedem Wert gehörige statistische Verteilung und mögliche Abhängigkeiten der Eigenschaften untereinander zu bestimmen. Damit könnte man, ähnlich der Monte Carlo Simulation, tausende Simulationsexperimente durchführen, in denen den Arbeitskräften Eigenschaftswerte entsprechend der Wahrscheinlichkeitsverteilung zugewiesen werden. Als Ergebnis erhielte man dabei Simulationsergebnisse, die zwar statistisch abgesichert wären, aber keinen konkreten Bezug zu den tatsächlich verfügbaren Ressourcen hätten.

Stattdessen ist es sinnvoll, die potentiellen Ressourcen und ihre Eigenschaften zu betrachten. Dabei kann es sich um konkrete Mitarbeiter bzw. Kolonnen eines Bauunternehmens oder Stereotypen von Bauarbeitskräften handeln. Die Verwendung von Mitarbeiterprofilen für einzelne Arbeitskräfte oder auch für bestimmte Kolonnen liefern die genauesten Daten, setzen aber den direkten Zugriff auf die Arbeitskräfte und ihre Daten voraus. Da dies beim in der Bauindustrie üblichen Einsatz von Nachunternehmern meist nicht umsetzbar ist, ist die Definition von Stereotypen mit bestimmten Eigenschaftswerten sinnvoll. Diese können dann entsprechend einer erfahrungsgemäßen Häufigkeitsverteilung in den Szenarien erzeugt werden, wobei ggf. Konkretisierungen beim Einsatz bekannter Nachunternehmer sinnvoll und möglich sind.

5.2.2 Durchführung und Auswertung der Simulationsexperimente

Die Experimente mit dem Simulationsmodell dienen der Prognose des Bauablaufs unter verschiedenen Randbedingungen, die in den Situationen definiert werden. Die Durchführung der Experimente erfolgt mit der Simulationsumgebung, die hierzu mit der Ausgangssituation beginnend das Verhalten der Agenten und ihrer Umwelt entsprechend dem vorgegebenen Verhalten rundenweise berechnet. Im Rahmen der Arbeitsvorbereitung können die so gewonnenen Daten dann verwendet werden, um die Auswirkungen bestimmter Parameter auf den Baufortschritt zu analysieren und letztlich Planwerte für die Bauausführung festzulegen. Die Teilschritte zur Durchführung und Auswertung der Simulationsexperimente sowie

die Festlegung der Planwerte unter Einbeziehung von Überlegungen zur Optimierung und zum Risiko sind in Abbildung 63 dargestellt. Für die Optimierung und Risikoanalyse stellt die Multiagentensimulation lediglich die Daten der Bauablauf-szenarien zur Verfügung. Deren Ergebnisse stellen schließlich die Basis zur Festlegung der Planwerte dar.

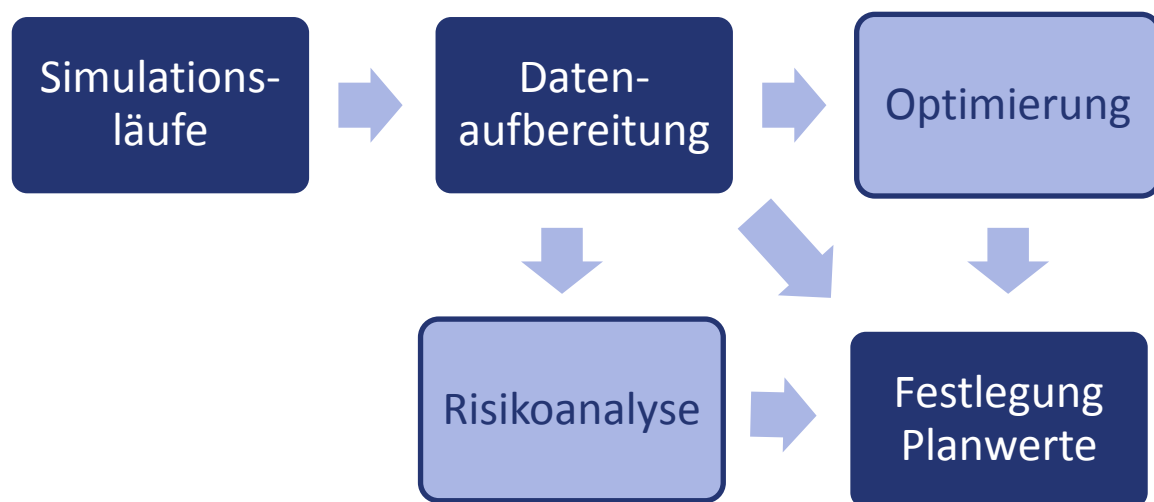


Abbildung 63: Vorgehensschritte zur Auswertung der Simulationsexperimente

Um die Ergebnisse der Simulationsläufe für die einzelnen Szenarien als Grundlage für die Termin- und Ressourcenplanung im Rahmen der Arbeitsvorbereitung nutzen zu können, werden während und nach dem Experiment eine Reihe von Variablen aufgezeichnet. Die zu dokumentierenden Daten über den Baufortschritt werden in Tabelle 14 aufgelistet und können nach ihrem Dokumentationsrhythmus in folgende drei Gruppen unterteilt werden:

1. Daten zu Parameterwerten sowie Daten, die das Szenario und den Simulationslauf als Ganzes beschreiben und daher einmalig am Ende des Experiments ausgelesen werden.
2. Daten über den Baufortschritt bezogen auf einzelne Bauteile, die bei Abschluss der jeweiligen Montage protokolliert werden.
3. Daten zum zeitlichen Verlauf von ergonomischen Kenngrößen, die kontinuierlich dokumentiert werden.

Bezeichnung	Entität	Beschreibung	Rhythmus
Montagestart	Fertigteil	Zeitpunkt, zu dem mit der Montage begonnen wurde	je Montage
Montageende	Fertigteil	Zeitpunkt, zu dem die Montage beendet ist	je Montage
Belastungen	Fertigteil	Belastungen durch die Montagearbeiten	je Montage
Leistungsangebot	Arbeitskraft	Leistungsangebot der Arbeitskraft, die die Montage ausführt	je Montage
Ermüdung	Arbeitskraft	Ermüdung je Arbeitskraft im Simulationsexperiment	jede Runde
Leistungsangebot	Arbeitskraft	Leistungsangebot je Arbeitskraft im Simulationsexperiment	jede Runde
Gesamtdauer	Umwelt	Dauer der Gesamtheit aller Montagen – in Arbeitszeit und Arbeitstagen	einmalig
Höchsttemperatur	Umwelt	Maximum der Temperatur als Kenngröße des Szenarios	einmalig
Anzahl Monteure	Umwelt	Anzahl der Agenten, die Montagearbeiten ausführen, in dem Szenario	einmalig
Anzahl Transporte	Umwelt	Anzahl der Agenten, die Transporte durchführen, in dem Szenario	einmalig
Motivation	Arbeitskraft	Motivation als ergonomische Eigenschaft der einzelnen Arbeitskräfte	einmalig
Belastbarkeit	Arbeitskraft	Belastbarkeit als ergonomische Eigenschaft einzelner Arbeitskräfte	einmalig
Qualifikation	Arbeitskraft	Qualifikation als ergonomische Eigenschaft jeder Arbeitskraft	einmalig
Pausendauer	Arbeitskraft	Summe der Dauern aller Erholpausen je Arbeitskraft	einmalig
Wartezeit	Arbeitskraft	Summe der Zeitdauern, in denen jede Arbeitskraft auf andere wartet	einmalig

Tabelle 14: Übersicht über die Variablen zur Dokumentation der Simulationsläufe

5.2.2.1 Aufbereitung der Daten aus den Simulationsläufen

Wegen der Verwendung von zufälligen Entscheidungen im Verhalten der Agenten kommt es bei mehreren Simulationsläufen für ein Szenario zu einer Streuung der Kennwerte zum Bauablauf. Es ist daher erforderlich, jedes Szenario mehrmals durchzuspielen, um einen mittleren Verlauf des Experiments identifizieren und als

Prognose verwenden zu können. Im Weiteren werden dann ausschließlich die Daten desjenigen Experiments verwendet, das dem Mittelwert am nächsten kam.

Die Montagedauer für ein Fertigteil lässt sich aus den bei jeder Fertigteilmontage dokumentierten Variablen als Differenz zwischen Start und Ende der Montage berechnen. Die Auswirkungen der ergonomischen Einflüsse auf die einzelnen Montagen kann man am besten über die Zusatzdauer je Fertigteil ermitteln. Sie entspricht der Differenz zwischen der normierten und der tatsächlichen Montagedauer. Die Zusatzdauer gibt die Dauer an, um die sich die Montage infolge des jeweiligen Leistungsangebots der Arbeitskraft von der theoretischen Grundzeit unterscheidet.

$$\text{Montagedauer} = \text{Montageende} - \text{Montagestart}$$

$$\text{Zusatzdauer} = \text{Montagedauer} - \text{theoretische Grundzeit}$$

Formeln 7: Gleichungen zur Berechnung der Montage- und Zusatzdauer

Gleichzeitig kann man auch den Zeitraum zwischen zwei Montagen durch einen Monteur bestimmen. Er setzt sich aus dem Warten auf, der Kommunikation mit und dem Transport des Fertigteils durch den Transportagenten sowie ggf. der Dauer einer Erholpause des Montageagenten zusammen. Summiert man die Dauern zwischen zwei Montagen für einen Monteur auf und subtrahiert dessen Pausendauer und Wartezeit für die gesamte Bauzeit, so erhält man die Dauer der Kommunikation und des Transports für diejenigen Fertigteile, die dieser montiert hat.

$$\text{Dauer zwischen Montagen}$$

$$= \text{Montagestart (Fertigteil } n) - \text{Montageende (Fertigteil } n - 1)$$

$$= \text{Wartezeit, Erholzeit, Dauer für Kommunikation \& Transport}$$

Formeln 8: Berechnung des Zeitraums zwischen zwei Fertigteil-Montagen

Als wichtige Kennzahlen für die Leistung der Arbeitskräfte und Geräte in einem Szenario lassen sich die mittlere Dauer für die Montage eines Fertigteils und der Leistungsfaktor jeder Arbeitskraft bestimmen. Der Kehrwert der mittleren Montagedauer entspricht bei Montagen mit nur einem Monteur dem Aufwandswert für die Montagearbeiten. Der Leistungsfaktor gibt für jede Arbeitskraft das Verhältnis ihrer Tätigkeits- und Erholzeiten zur normierten Grundzeit an.

$$\text{mittlere Dauer} = \text{Gesamtdauer} \div \text{Anzahl Fertigteile}$$

$$\text{Leistungsfaktor} = \frac{\text{Gesamtdauer} - (\text{Wartezeit} + \text{Zusatzdauern})}{\text{Anzahl Fertigteile} \times \text{normierte Grundzeit}}$$

Formeln 9: Berechnung der Kennwerte für ein Szenario

5.2.2.2 Bereitstellung und Nutzbarkeit der Simulationsergebnisse für die Optimierung

Die Daten, die mit der ergonomiegestützten Multiagentensimulation erzeugt werden, bilden die Basis für eine detaillierte Optimierung der Termin- und Ressourcenplanung. Insbesondere die genaue Modellierung von kapazitiven und technologischen Abhängigkeiten stellt hier einen Vorteil dar. Mögliche Ziele der Optimierung auf Grundlage der Simulationsergebnisse können eine Minimierung der Bauzeit oder des Ressourceneinsatzes sowie eine Maximierung der Leistungsfähigkeit bei gegebenen Randbedingungen sein. Eine direkte Optimierung der Kosten ist basierend auf den Simulationsergebnissen nicht möglich, aber die Prognosedaten zum Bauablauf können als Eingangsdaten für die Kalkulation von Kosten verwendet werden.

Die Simulationsergebnisse, die als Basis für die Optimierung dienen, sind Szenarien mit identischen Umweltbedingungen, aber unterschiedlichem Ressourceneinsatz. Dabei können sowohl die Anzahl als auch die Zusammensetzung der Arbeitskräfte hinsichtlich ihrer Aufgabe beziehungsweise ihren Eigenschaften variieren. Für alle Szenarien werden die in Tabelle 15 aufgelisteten Kennwerte bestimmt und verglichen. Je nach Zielsetzung und Randbedingungen ergibt sich daraus dann der optimale Ressourceneinsatz. Häufig ist derjenige Ressourceneinsatz optimal, bei dem die Höchstdauer eingehalten wird und der Gesamtaufwandswert minimal ist.

Bezeichnung	Bestimmung
Gesamtdauer	Gesamtdauer der Montagearbeiten
Wartezeiten je Arbeitskraft	Wartezeit der einzelnen Arbeitskräfte
Anzahl & Typ Montageagenten	Anzahl sowie ggf. Stereotyp der für die Montage von Fertigteilen eingesetzten Agenten
Anzahl & Typ Transportagenten	Anzahl sowie ggf. Stereotyp der für den Transport von Fertigteilen eingesetzten Agenten
Gesamtaufwandswert	Quotient aus Gesamtdauer und Anzahl der Montage- & Transportagenten

Tabelle 15: Kennwerte für die Optimierung des Ressourceneinsatzes

5.2.2.3 Möglichkeiten der Risikoanalyse auf Basis von Daten aus der Simulation

Risiken sind Faktoren, die während eines Projekts auftreten können und positive oder negative Auswirkungen auf die Zielerreichung haben.²⁰⁶ Die Risikoanalyse auf Basis der Ergebnisse respektive Daten der ergonomiegestützten Multiagentensimulation bezieht sich in erster Linie auf den Einfluss der Witterungsbedingungen auf den Baufortschritt, kann aber auch andere Aspekte wie Lieferengpässe oder Geräteausfall berücksichtigen. Die Daten aus den Simulationsexperimenten geben Auskunft über das Ausmaß und die Wahrscheinlichkeit von Veränderungen der Bauzeit infolge extremer Witterungsbedingungen. Im Rahmen der Risikoanalyse ist es möglich, diese Daten statistisch auszuwerten und das Risiko aufgrund von Witterungseinflüssen zu quantifizieren.

Für die Simulationsexperimente zur Generierung von Daten für die Risikoanalyse können entsprechend Abschnitt 5.2.1.1 der Mittelwert sowie die 5%-, 20%-, 80%- und 95%-Quantilen der Temperatur für ansonsten identische Szenarien angesetzt werden. Die in Tabelle 16 aufgelisteten Kennwerte zu den Simulationsergebnissen sind dann zusammen mit der Eintrittswahrscheinlichkeit zur Analyse des Risikos infolge Witterung einsetzbar.

²⁰⁶ Vgl. Sandoval-Wong, Schwarz (2009): Risikomanagement – Realität und Herausforderungen in der Bauindustrie

Bezeichnung	Bestimmung
Gesamtdauer	Gesamtdauer der Montagearbeiten
Leistungsfaktor	Verhältnis der normierten Grundzeit zur Montagedauer mit ergonomischen Einflüssen und Erholpausen
Witterungsparameter	Höchsttemperatur inkl. statistischer Daten
Gesamtaufwandswert	Quotient aus Gesamtdauer und Anzahl der Montage- & Transportagenten

Tabelle 16: Kennwerte für die Risikoanalyse bezüglich des Baufortschritts bei extremen Temperaturen

Als wahrscheinliche Spanne für die Gesamtdauer können die Kennwerte der 20%- und 80%-Quantile angesetzt werden. Die Dauer des 5%- bzw. 95%-Quantils wird dagegen i.d.R. nur mit einer Wahrscheinlichkeit von 5% überschritten, da bei einer monatsweisen Betrachtung nur das obere oder untere Quantil der Temperatur zu einem Rückgang des Leistungsangebots führt. Im Sinne der Risikobewältigung sollten für diese Fälle ein entsprechender Risikozuschlag bzw. adäquate Gegenmaßnahmen vorgesehen respektive vorgehalten werden, falls eine Bauzeitverlängerung auch bei extremen Witterungsverhältnissen nicht hinnehmbar ist.

5.2.2.4 Festlegung von Planwerten basierend auf den Simulationsergebnissen

Die Arbeitsvorbereitung hat die Aufgabe, Planwerte für das Controlling der Bauausführung bereitzustellen. Dazu ist es erforderlich, die Szenarien für die Bauabläufe, wie oben beschrieben, zu analysieren und darauf aufbauend die einzusetzenden Ressourcen und anzunehmenden Witterungsbedingungen festzulegen. Diese Entscheidungen definieren dann die Planwerte der Randbedingungen, unter denen der planmäßige Baufortschritt erreicht wird.

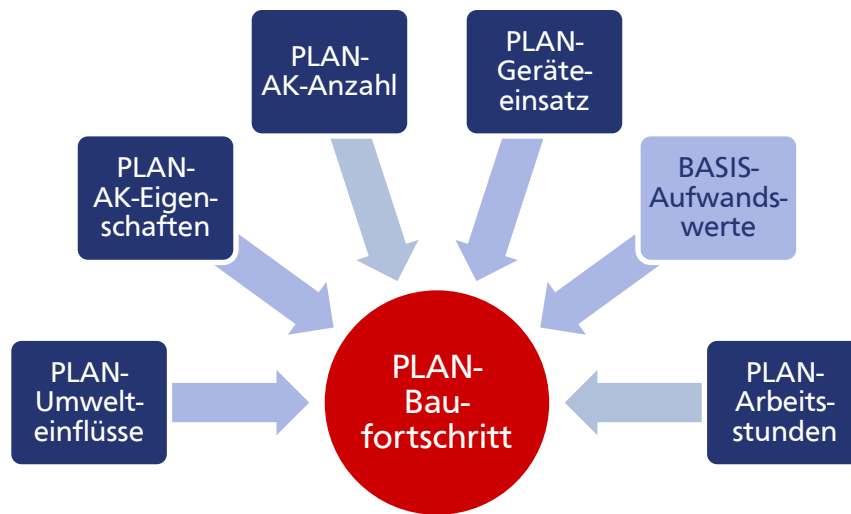


Abbildung 64: Einflussgrößen auf den Plan-Baufortschritt

Den Verlauf des planmäßigen Baufortschritts und damit den Plan-Terminplan und den Plan-Ressourceneinsatz erhält man durch Simulationsexperimente mit einer Situation, deren Parameter, wie in Abbildung 64 dargestellt, den Planwerten für die Randbedingungen entsprechen. Die so gewonnen Daten und Kennwerte können um weitere Daten ergänzt werden und dienen als Grundlage für alle weiteren Arbeitsschritte.

5.2.3 Bereitstellung der Termin-Plan-Daten und deren Parameter

Wenn die Simulationsexperimente durchgeführt, ihre Ergebnisse ausgewertet und Planwerte für den Baufortschritt und Ressourceneinsatz festgelegt wurden, ist es sinnvoll, die erzeugten Plan-Daten möglichst vielen potentiellen Nutzern und deren Software-Werkzeugen zugänglich zu machen. Ziel ist es, einmal erzeugte Daten für nachfolgende Planungs- und Steuerungsprozesse, wie die Arbeitskalkulation oder das Termin-Controlling, in einer Form zur Verfügung zu stellen, die eine weitgehend automatisierte Verwendung ermöglicht.

Wie bereits in Kapitel 2.2 erläutert, eignen sich hierzu Ontologien in besonderer Weise. Da die Daten der Simulationsexperimente aber in der Regel nicht direkt als Ontologien ausgegeben werden, ist eine Transformation der Daten aus dem Ursprungsformat in das Ontologie-Format OWL erforderlich. Hierzu werden die Mechanismen, wie sie in Abschnitt 4.6.3 beschrieben sind, angewendet.

In jedem Fall sind die Plan-Daten zu den Terminen und dem Ressourceneinsatz zusammen mit den maßgeblichen Randbedingungen respektive Parametern in einer ABox der Ontologie abzuspeichern und als Plan-Daten zu attributieren. Da-

rüber hinaus ist es sinnvoll, auch weitere Szenarien, insbesondere bezüglich nicht steuerbarer Umwelteinflüsse, bereitzustellen. Hierdurch sind im Fall, dass sich diese Szenarien einstellen, sofort die entsprechenden Prognosen zum Baufortschritt verfügbar.

5.3 Nutzung der Multiagentensimulation für die Kontrolle und Steuerung des Baufortschritts

Im Rahmen der Arbeitsvorbereitung wird unter anderem der Ablauf der Bauarbeiten hinsichtlich einzuhaltender Termine, einzusetzender Ressourcen, zugehöriger Kosten und erreichbarer Qualitäten geplant. Um die Umsetzung dieser Planung während der Bauausführung sicherzustellen und falls erforderlich anzupassen, ist die Durchführung eines Plan-Soll-Ist-Prognose-Vergleichs zur Identifikation und Quantifizierung von Abweichungen anzustreben.

Beim Plan-Soll-Ist-Prognose-Vergleich werden die Daten zu vier Bauabläufen miteinander verglichen. Dies sind der planmäßige Bauablauf entsprechend der Arbeitsvorbereitung, der Bauablauf, wie er aufgrund der tatsächlichen Gegebenheiten stattgefunden haben sollte, und der tatsächliche Bauablauf, wie er stattgefunden hat, sowie der gegenwärtig zu erwartende Bauablauf in der Zukunft. Dadurch kann die Aussagekraft gegenüber dem Soll-Ist-Vergleich erhöht werden.

Damit eine aktive Steuerung der Bauprozesse anhand der Erkenntnisse aus den Vergleichen der unterschiedlichen Daten zum Baufortschritt möglich ist, müssen diese möglichst zeitnah erfolgen. Hier ist die Multiagentensimulation ein effizientes Werkzeug, da sie in der Lage ist, den Soll- und Prognose-Bauablauf per Experiment zu ermitteln, wobei die tatsächlichen Randbedingungen als Eingangswerte zur Aufstellung der Szenarien dienen. Werden die Eingangswerte auf der Baustelle digital erfasst und in Form einer Ontologie zur Verfügung gestellt, so ist eine automatisierte Erstellung der Szenarien möglich, und die Durchführung der Kontrolle und Steuerung des Bauablaufs kann zeitnah erfolgen.²⁰⁷

Der Detaillierungsgrad der Bauablaufprognose mittels der Multiagentensimulation mit dem ergonomischen Leistungs-Ermüdungsmodell erlaubt präzise Aussagen über die Einflüsse auf die Leistung der einzelnen Arbeitskräfte und deren Zusam-

²⁰⁷ Vgl. Motzko et al (2010): Echtzeitsteuerung von Bauprozessen

menarbeit. Um diese Genauigkeit auf den Soll-Ist-Vergleich zu übertragen, ist eine differenzierte Definition der Soll-Werte sowie der Prognose-Werte erforderlich.

5.3.1 Erzeugung von Soll-Daten zum Baufortschritt

Die Soll-Größen für den Soll-Ist-Vergleich entstehen durch Verknüpfung der Planwerte mit den tatsächlichen Ist-Werten der Baustelle. Im Folgenden soll zunächst diskutiert werden, welche Faktoren auf der Baustelle in welcher Form mit den Planwerten aus der Arbeitsvorbereitung verknüpft werden können. Dabei wird eine begriffliche Abgrenzung der Soll-Größen definiert. Die Erfassung und Kommunikation der Daten von der Baustelle wird beschrieben und abschließend die Aufstellung von Szenarien und Durchführung von Simulationsexperimenten zur Erzeugung von Soll-Daten zum Baufortschritt dargestellt.

5.3.1.1 Definition des Soll-Baufortschritts bezüglich der Ergonomie

Bei den heute im Bauwesen üblichen Soll-Ist-Vergleichen wird der Soll-Wert als Kombination aus Planwerten für den Aufwand und tatsächlich erbrachter Leistung verstanden. In der Terminplanung werden dazu die Plan-Aufwandswerte aus der Arbeitsvorbereitung mit den Ist-Mengen von der Baustelle multipliziert, um die Soll-Stunden zu berechnen.²⁰⁸ Diese Soll-Stunden können dann den geleisteten Ist-Stunden gegenübergestellt werden.

Aufgrund der Fortschritte in der Sensorik und der Informationstechnologie ist es heute möglich, eine Vielzahl von Parametern, die Einfluss auf den Baufortschritt haben, auf der Baustelle zu erfassen. Zugleich ermöglicht die ergonomiebasierte Multiagentensimulation eine detaillierte Prognose des Bauablaufs in Abhängigkeit von vielen Eingangswerten. Diese Möglichkeit bleibt beim herkömmlichen Termin-Soll-Ist-Vergleich ungenutzt, da Einflüsse aus der Sphäre der Ergonomie in der Regel bei der Berechnung des Soll-Werts nicht berücksichtigt werden. Häufig wird aber eine Terminabweichung durch die Änderung mehrerer Randbedingungen, wie Witterung sowie Anzahl und Qualifikation der Arbeitskräfte, verursacht. Berücksichtigt man beim Soll-Wert die bereits bekannten Veränderungen, so ist es möglich, darüberhinausgehende Behinderungen zu identifizieren. Dies wäre ansonsten nur im Rahmen einer Schwachstellenanalyse im Anschluss an den Soll-Ist-Vergleich möglich.

²⁰⁸ Vgl. Girmscheid, Motzko (2007): Kalkulation und Preisbildung in Bauunternehmen, S. 107

Es wird daher vorgeschlagen, den Soll-Baufortschritt als Funktion aus dem Basis-Aufwandswert und den tatsächlichen Einflüssen auf das Leistungsangebot und die Ermüdung zu definieren. Der Basis-Aufwandswert ergibt sich entsprechend Abschnitt 4.3.2 aus der normierten Basis-Grundzeit zuzüglich der Verteilzeit aus zusätzlichen Tätigkeiten. Für die Berechnung des Soll-Baufortschritts werden anstatt der in der Arbeitsvorbereitung festgelegten Plan-Werte für die Parameter des ergonomischen Leistungs-Ermüdungsmodells die tatsächlichen Ist-Werte von der Baustelle verwendet. Damit erzeugt das Simulationsexperiment eine Prognose des Baufortschritts, die alle bekannten Einflussgrößen einbezieht und den oben definierten Soll-Wert darstellt.

5.3.1.2 Ermittlung des Soll-Baufortschritts per Simulationsexperiment aus Baustellen Ist-Daten

Zur zeitnahen Berechnung des Soll-Baufortschritts in der oben beschriebenen Form müssen die erforderlichen Baustellen-Ist-Daten digital vorliegen. Die Erfassung und digitale Speicherung von Daten auf der Baustelle kann dabei auf zwei Wegen erfolgen. Zum einen ist es möglich, Dokumente des traditionellen Berichtswesens, wie Bautagebücher, digital zu erzeugen und die Daten zur Verfügung zu stellen. Zum anderen kann die rechnergestützte Auswertung von Sensordaten von der Baustelle zeitnah generieren.

Die Kommunikation der Baustellen-Ist-Daten sollte möglichst ganzheitlich erfolgen, die einzelnen Daten in einen Gesamtkontext stellen und die Anbietergrenzen proprietärer Datenformate überwinden. Die Nutzung der in Kapitel 2.2.4 vorgestellten Darmstädter Baubetriebsontologie ermöglicht die systemoffene Kommunikation und stellt die Ist-Daten in einen maschinenlesbaren Gesamtkontext.

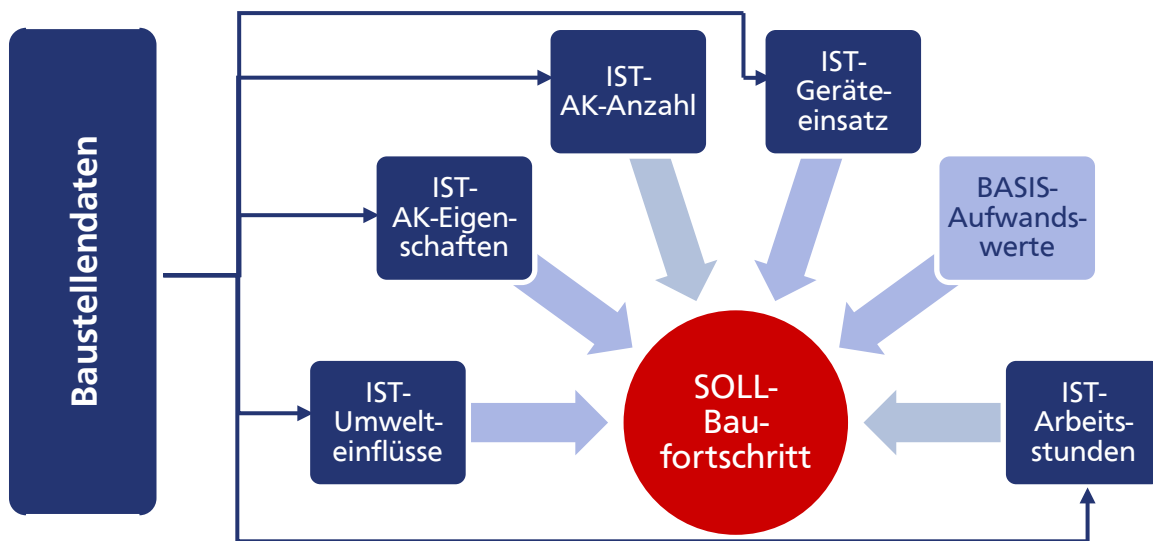


Abbildung 65: Ist-Daten und Basis-Werte zur Ermittlung des Soll-Baufortschritts

Zur Ermittlung des Soll-Baufortschritts mit Hilfe der Multiagentensimulation sind zunächst die Ist-Daten der Baustelle und der planmäßigen Basis-Aufwandswerte aus der Arbeitsvorbereitung als Eingangswerte für ein Simulationsexperiment zu definieren. Dazu wird in der Simulationsumgebung eine Situation mit den tatsächlichen Parametern von der Baustelle erzeugt und dient als Ausgangspunkt für das Simulationsexperiment. Wie in Abbildung 65 dargestellt, gehen sowohl die Ist-Werte der ergonomischen Belastungen und Eigenschaften als auch der tatsächliche Ressourceneinsatz und die tatsächlichen Arbeitsstunden zusammen mit den Basis-Aufwandswerten in die Bestimmung des Soll-Baufortschritts ein. Die Durchführung des Simulationsexperiments prognostiziert dann den Bauablauf für die entsprechenden Randbedingungen, so dass es möglich ist, den Soll-Baufortschritt für einen beliebigen Zeitpunkt aus den Simulationsergebnissen zu ermitteln.

5.3.2 Erstellung von Prognosen zum zukünftigen Baufortschritt

Basierend aus den aktuellen Daten zum Bauablauf ist es mit Hilfe der Multiagentensimulation möglich, präzise Prognosen zum weiteren Baufortschritt zu machen. Außerdem kann die Wirkung verschiedener Optionen zur Beschleunigung des Baufortschritts vorhergesagt werden. Dies ist von besonderer Wichtigkeit, da die Einhaltung der geplanten Terminziele für die Umsetzung der unternehmerischen Ziele des Auftragnehmers und auch Auftraggebers im Rahmen eines Bauprojektes von zentraler Bedeutung ist. Die präzise Prognose des Baufortschritts liefert hierzu die erforderlichen Informationen für eine exakte und zeitnahe Steuerung der Bauprozesse.

5.3.2.1 Prognose des Baufortschritts basierend auf dem aktuellen Kenntnisstand

Ziel der Prognose des Baufortschritts im Verlauf der Bauausführung ist es, präzise Aussagen über den zu erwartenden künftigen Baufortschritt zu treffen, um so über die Notwendigkeit von Beschleunigungsmaßnahmen entscheiden zu können. Für die Bestimmung des Prognose-Baufortschritts sind daher die jeweils aktuellsten verfügbaren Informationen zu verwenden. Dazu zählt auch der Ist-Basis-Aufwandswert. Er ergibt sich aus den Soll-Ist-Abweichungen, deren Ursache nicht abgestellt wurde, und kann mit Simulationsexperimenten iterativ bestimmt werden.

Als Startpunkt für die Prognose des Endtermins dient der Ist-Baufortschritt, von dem aus mit den aktuellsten verfügbaren Parametern der weitere Bauablauf simuliert wird. Wie in Abbildung 66 zu sehen ist, sind hierzu als Eingangsgrößen die künftige Witterung, die Arbeitskräfte nach Anzahl und Eigenschaften sowie der Geräteeinsatz und die Arbeitsstunden zu prognostizieren respektive festzulegen und der Ist-Basis-Aufwandswert zu verwenden.

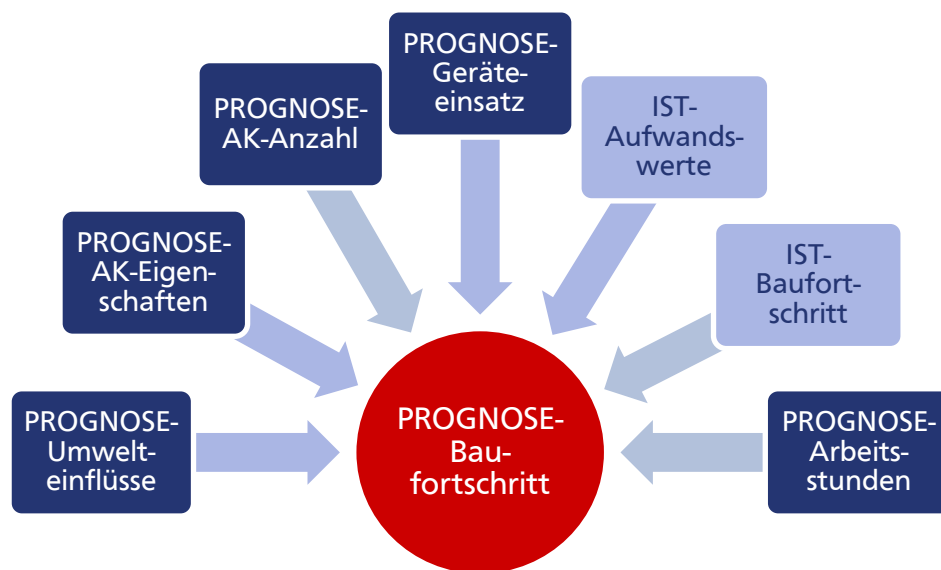


Abbildung 66: Einflussgrößen auf den Prognose-Baufortschritt

5.3.2.2 Prognose der Auswirkungen von Steuerungsmaßnahmen

Gibt es Abweichungen beim Plan-Prognose-Vergleich des Endtermins, so sind i.d.R. Steuerungsmaßnahmen zu treffen, um den geplanten Baufortschritt einzuhalten. Steuerungsmaßnahmen bestehen meist in der Veränderung einzelner oder mehrerer beeinflussbarer Parameter des Baufortschritts. Dabei handelt es sich

häufig um die Arbeitskräfte bzw. Ressourcen und deren tägliche bzw. wöchentliche Arbeitsstunden.

Mit Hilfe der ergonomiebasierten Multiagentensimulation ist es möglich, den aus jeder Steuerungsoption resultierenden Baufortschritt zu bestimmen. Dabei sind die bereits verstrichene Zeit und der erreichte Baufortschritt sowie die aktuellen Prognosen für die nicht beeinflussbaren Parameter als fixe Randbedingungen zu verwenden. Daneben werden für jede zu untersuchende Beschleunigungsmaßnahme die optionalen also beeinflussbaren Parameter, die in Abbildung 67 hervorgehoben sind, definiert.

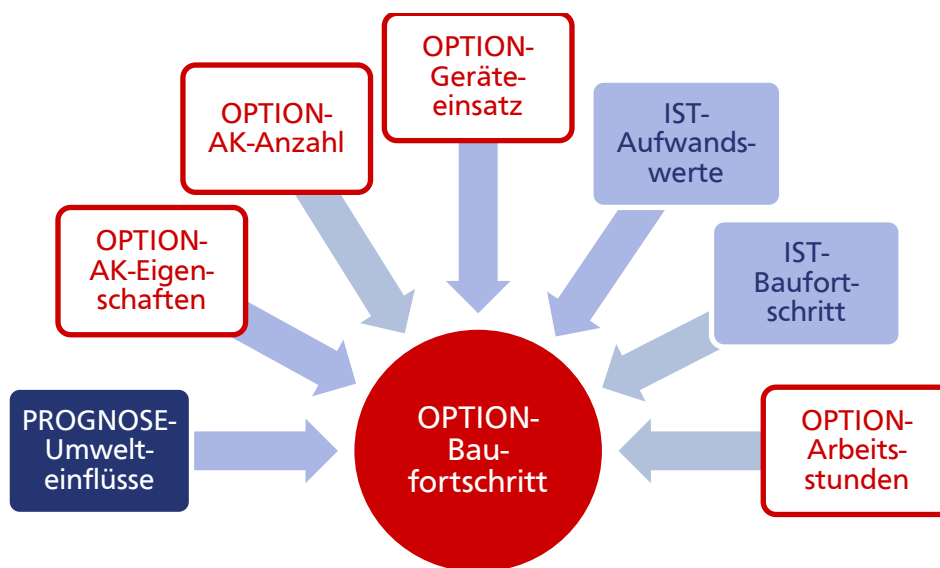


Abbildung 67: Optionen zur Beeinflussung des Baufortschritts

Als Ergebnis der Simulationsexperimente erhält man den Option-Baufortschritt und den damit erreichbaren Endtermin für jede untersuchte Steuerungsmaßnahme.

5.3.3 Durchführung des Plan-Soll-Ist-Prognose-Vergleichs

Im Rahmen des Plan-Soll-Ist-Prognose-Vergleichs für den Baufortschritt werden die Abweichungen des Soll-Baufortschritts vom Plan-Baufortschritt infolge geänderter Randbedingungen quantifiziert sowie Abweichungen des Ist-Baufortschritts gegenüber dem aufgrund der vorliegenden Informationen zu erwartenden Soll-Baufortschritt identifiziert. Außerdem wird der Plan-Baufortschritt mit dem Prognose-Baufortschritt verglichen, um eine mögliche Diskrepanz zwischen den gesetzten Zielen für den Endtermin und der aktuellen Prognose zum Baufortschritt zu identifizieren und ggf. gegensteuern zu können.

Je häufiger und zeitnaher die unterschiedlichen Daten zum Baufortschritt verglichen werden, desto schneller und wirksamer können Maßnahmen zur Steuerung der Prozessgeschwindigkeit getroffen werden. Folglich ist eine Vielzahl von Plan-Soll-Ist-Prognose-Vergleichen durchzuführen. Neben dem Baufortschritt, der im Fokus dieser Arbeit liegt, sind stets auch die anfallenden Arbeitsstunden und Kosten sowie die tatsächlich auszuführenden Mengen zu kontrollieren.

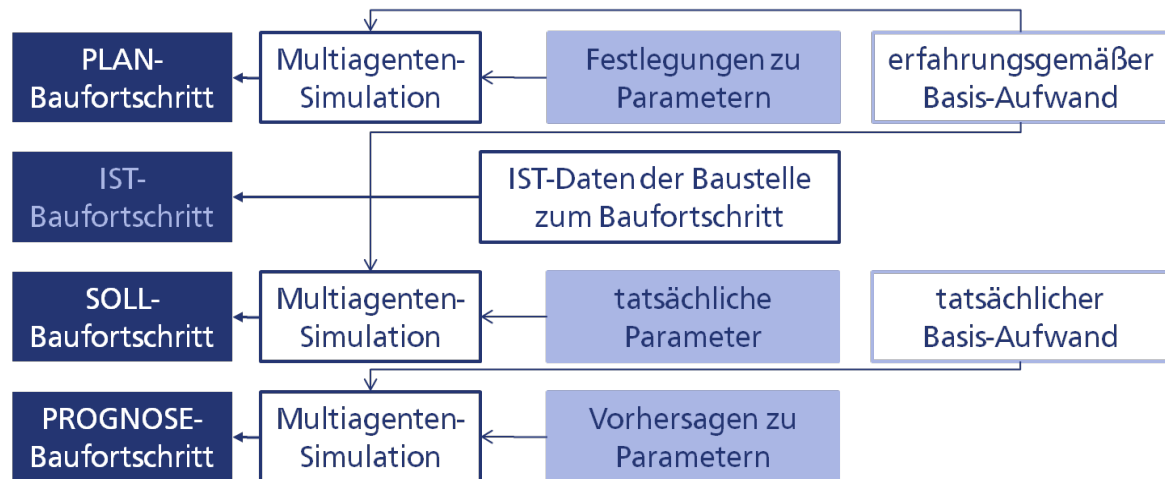


Abbildung 68: Datenquellen zur Bestimmung der Plan-, Soll-, Ist- und Prognose-Werte zum Baufortschritt

In Abbildung 68 sind die Datenquellen und die Bestimmung der Baufortschritte dargestellt. Der Plan-Baufortschritt wird mit Hilfe der Multiagentensimulation auf der Grundlage von Basis-Aufwandswerten und der Festlegung von Parametern in der Arbeitsvorbereitung bestimmt. Der Ist-Baufortschritt wird auf der Baustelle festgestellt. Der Soll-Baufortschritt wird mit der Multiagentensimulation ermittelt, indem die Basis-Aufwandswerte aus der Arbeitsvorbereitung mit den tatsächlichen Parametern kombiniert werden. Für die Bestimmung des Prognose-Baufortschritts erfolgt die Simulation mit den tatsächlichen Basis-Aufwandswerten, die gegebenenfalls von den vorher angenommenen Erfahrungswerten abweichen. Dazu kommen Vorhersagen für die zukünftigen Werte der Parameter.

Im Folgenden werden zunächst die Möglichkeiten zur Abfrage von Simulationsergebnissen und Sensordaten aus Ontologien beschrieben. Danach wird ein Konzept zur Nutzung dieser Daten für die Durchführung eines Plan-Soll-Ist-Prognose-Vergleichs erläutert. Die Implementierung eines zeitnahen Vergleichs von Plan-, Soll-, Ist- und Prognose-Werten zum Baufortschritt kann unter anderem in bestehenden Controlling-Werkzeugen erfolgen, mit Tabellenkalkulations-Software durchgeführt oder mit autonomen Software-Agenten umgesetzt werden.

5.3.3.1 Bereitstellung und gezieltes Abrufen der Daten zum Baufortschritt

Neben den Plan-Daten, die, wie in Abschnitt 5.2.3 dargelegt, im Rahmen der Arbeitsvorbereitung in einer ABox der Ontologie gespeichert wurden, werden auch die Soll-Daten zum Baufortschritt nach ihrer Ermittlung in agentenbasierten Simulationsexperimenten in ABoxen gespeichert. Die Ist-Daten aus der Bauprozessdetektion sollten ebenfalls als ABoxen vorliegen, so dass sie maschinenlesbar für die Kontrolle des Baufortschritts und als Eingangswerte für die Soll-Ermittlung zur Verfügung stehen.

In jeder ABox liegen alle Daten und Informationen, wie in Abbildung 69 dargestellt, mit den jeweiligen Prozessen verknüpft vor und können entsprechend abgerufen werden. Beispielhaft ist dies mit Anfragesprachen für OWL-Ontologien wie SPARQL und SQWRL möglich, deren Funktionsweise in Abschnitt 2.2.3.2 erläutert wurde. Beide Anfragesprachen ermöglichen die Ausgabe der gesuchten Daten aus der Ontologie in Zusammenhang mit weiteren über die Ontologie verknüpften Daten. So ist es beispielsweise möglich, alle Bauteile, deren Montageprozess nach den Plan- respektive Soll-Daten fertig sein sollte oder nach den Ist-Daten fertig ist, mit den zugehörigen Ressourcen und Randbedingungen auszugeben.

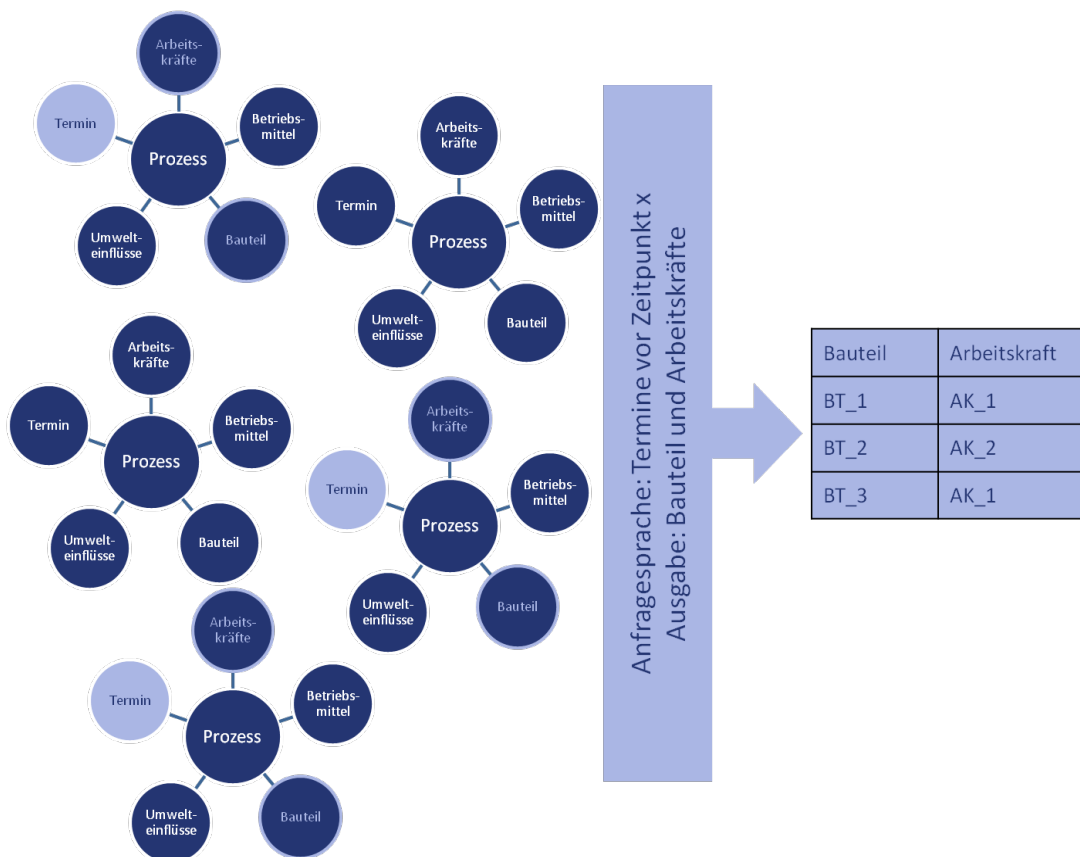


Abbildung 69: Anfragen unterschiedlicher Daten aus der ABox

5.3.3.2 Nutzung der Daten zum Baufortschritt

Zur Durchführung des zeitnahen Plan-Soll-Ist-Prognose-Vergleichs zum Baufortschritt werden aus den entsprechenden ABoxen diejenigen Bauteile, die zum Kontrollzeitpunkt fertig sind, abgerufen und gezählt. Damit erhält man den Plan-, Soll-, Ist- und Prognose-Baufortschritt zum Kontrollzeitpunkt in Form der Kenngröße „fertiggestellte Bauteile“. Wie in Abbildung 70 dargestellt ist, kann daraus die Plan-Soll-Differenz, die Soll-Ist-Differenz und die Plan-Prognose-Differenz ermittelt und auch bewertet werden.

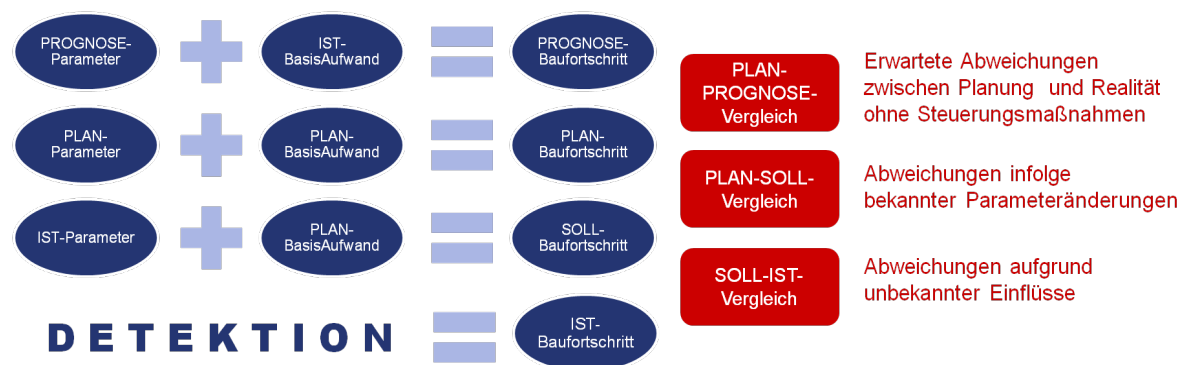


Abbildung 70: Gegenüberstellung von Werten im Rahmen eines Plan-Soll-Ist-Prognose-Vergleichs zum Baufortschritt

Die Plan-Soll-Differenz dient dazu, die Auswirkungen der bekannten Abweichungen zwischen den geplanten und tatsächlichen Randbedingungen der Bauausführung zu quantifizieren. Dies ermöglicht eine genauere Analyse und unterstützt die Entscheidung über gegebenenfalls erforderliche Gegenmaßnahmen.

Der Soll-Ist-Vergleich ermöglicht es, die Existenz von Einflüssen mit Auswirkungen auf den Baufortschritt zu erkennen, die bis dato nicht bekannt sind. Gibt es signifikante Soll-Ist-Abweichungen, so müssen die Prozesse und deren Einflussfaktoren eingehend analysiert werden, um den Grund für die Differenz zwischen dem Soll- und Ist-Baufortschritt zu identifizieren. Kann kein Grund festgestellt werden oder ist dieser nicht abstellbar, so müssen die Prognosen über weiteren Baufortschritt entsprechend angepasst werden.

Der Prognose-Baufortschritt und der damit vorhergesagte Endtermin kann in einem Plan-Prognose-Vergleich verwendet werden, um festzustellen, ob der Planwert für den Endtermin aus jetziger Sicht ohne Beschleunigungsmaßnahmen eingehalten wird. Sind signifikante Verzögerungen zu erwarten, so sind Maßnahmen zur Einhaltung der geplanten Ziele zu überprüfen. Wird eine Fertigstellung vor dem Plan-Endtermin prognostiziert, können eventuell Einsparungen realisiert werden.

Als Datenbasis für derartige Steuerungsmaßnahmen können Option-Baufortschritte, die die Auswirkungen unterschiedlicher Parameterveränderungen vorhersagen, dienen. In Kombination mit den Eingangsgrößen bezüglich des Ressourceneinsatzes und der zugehörigen Kostenkennwerten lässt sich auf Basis der Simulationsergebnisse die Wirtschaftlichkeit jeder Alternative beurteilen. Diese Informationen dienen den Verantwortlichen dann als Grundlage für die Festlegung von Maßnahmen zur Steuerung der Bauprozesse mit dem Ziel der Einhaltung des Plan-Endtermins.

Kapitel 6

Anwendungsbeispiel: Simulation der Montage einer modularen Fassadenbekleidung

6.1 Überprüfung des Vorgehensmodells anhand eines Anwendungsbeispiels

Die ergonomiegestützte Multiagentensimulation der Montageprozesse eines modularen Fassadenbekleidungssystems dient als Anwendungsbeispiel zur Überprüfung des in den Kapiteln 4 und 5 beschriebenen Vorgehensmodells. Entsprechend dem in Abbildung 2 dargestellten Schema zur Durchführung dieser Forschungsarbeit soll dabei die Plausibilität, Nutzbarkeit und Praxistauglichkeit des entwickelten Vorgehensmodells überprüft werden. Anhand der praktischen Umsetzung der Multiagentensimulation für den konkreten Montageprozess der Fassadenmodule wird das allgemeine Modell zum Aufstellen eines lauffähigen, ergonomiegestützten Multiagentenmodells sowie der Durchführung und Auswertung von Experimenten einem praxisnahen Test unterzogen.

Zur Plausibilitätsprüfung und als Versuch der Falsifizierung des Vorgehensmodells wird die Simulation der Fassadenmontage dem Vorgehensmodell folgend Schritt für Schritt umgesetzt und analysiert. In diesem Kapitel wird das Fassadensystem vorgestellt, dann die schrittweise Modellierung des Bauablaufs sowie der Einsatz dieser Multiagentensimulation im Baubetrieb erläutert und analysiert, schließlich erfolgt die Gesamtbewertung des Vorgehensmodells. Für jeden der Simulationsschritte wird dabei das Praxisproblem beschrieben, der Lösungsalgorithmus entsprechend dem Vorgehensmodell vorgestellt und danach ein Fazit hinsichtlich der Plausibilität und Praxistauglichkeit des Vorgehens gezogen.

6.2 Vorstellung des Fassadensystems

Im Folgenden wird das Konzept des modularen Fassadensystems und der für seine Montage erforderlichen Prozesse beschrieben. Die Vorteile der Qualitätsverbesserung, Bauzeitverkürzung und häufig Kostenminderung durch die stationäre Werksfertigung²⁰⁹ beim modularen Bauen kommen bei Fassadensystemen besonders zum Tragen. Denn hier besteht die Möglichkeit, eine Vielzahl von Gewerken in die Vorfertigung im industriellen Rahmen zu integrieren und so Schnittstellenprobleme auf der Baustelle zu minimieren.²¹⁰

Im Hinblick auf die Montageprozesse ist die technische Ausbildung der Schnittstellen zwischen den Bestandteilen eines modularen Fassadensystems untereinander und mit der Tragstruktur von Bedeutung. Hierbei sind tragkonstruktive, bauphysikalische und ästhetische Anforderungen gleichermaßen zu beachten und insbesondere die Aufnahme von Maßabweichungen zu berücksichtigen. Beim Anschluss von Elementfassaden an Skelettkonstruktionen im Neubau werden die Toleranzen im Rohbau meist durch Langlöcher in den Auflagerkonstruktionen ausgeglichen, und in den Fugen zwischen den Elementen werden bei der Montage Dichtungsprofile eingebaut.²¹¹ Zur Modernisierung bestehender Lochfassaden mit einer modularen Außenwandbekleidung muss die Schnittstelle der Module zur gemauerten und verputzten Außenwand gelöst werden.

Das Fassadensystem, das als Grundlage für die Montagesimulation diente, wurde im Rahmen eines Forschungsprojektes durch das Institut für Baubetrieb und die Fachgebiete „Entwerfen und Gebäudelehre“ sowie „Entwerfen und Gebäudetechnologie“ der TU Darmstadt im Auftrag von alsecco und THS Consulting entwickelt. Ziel war die bauphysikalische und gestalterische Modernisierung von Mehrfamilienhäusern aus der Nachkriegszeit. Dieser Gebäudetypus existiert in industriellen Ballungsräumen in großer Zahl und ist häufig im Besitz kommunaler Wohnungsbaugesellschaften, die im Rahmen einer energetischen Modernisierung häufig auch eine allgemeine Aufwertung ihrer Gebäude anstreben.

Aufgrund der sich wiederholenden Grundrisse und einer Gebäudehöhe von zwei bis drei Stockwerken, erscheint der Einsatz von vorgefertigten Modulen zur Fassadenbekleidung sinnvoll und wurde als Zielsetzung vorgegeben. Das entwickelte

²⁰⁹ Vgl. Bachmann et al (2009): Bauen mit Betonfertigteilen im Hochbau; in Betonkalender, S. 156 f.

²¹⁰ Vgl. Knaack et al (2007): Fassaden – Prinzipien der Konstruktion, S. 125

²¹¹ Vgl. ebenda, S. 60 ff.

System besteht aus drei Komponenten, die zugleich architektonischen und bauphysikalischen Anforderungen genügen und effizient montiert werden können. Wie in der Explosionszeichnung in Abbildung 71 zu erkennen ist, wird die Wandfläche mit gebäudehohen Fassadenmodulen bekleidet. Diese bestehen aus einer tragenden Holzkonstruktion in zwei Ebenen mit dazwischenliegender Dämmung und einer hinterlüfteten Dekorschicht. Die Fugen zwischen den Fassadenmodulen werden mittels Deckelementen kaschiert, und an den Fenster- und Türöffnungen sorgen so genannte Einsatzmodule für einen dichten Anschluss.²¹²

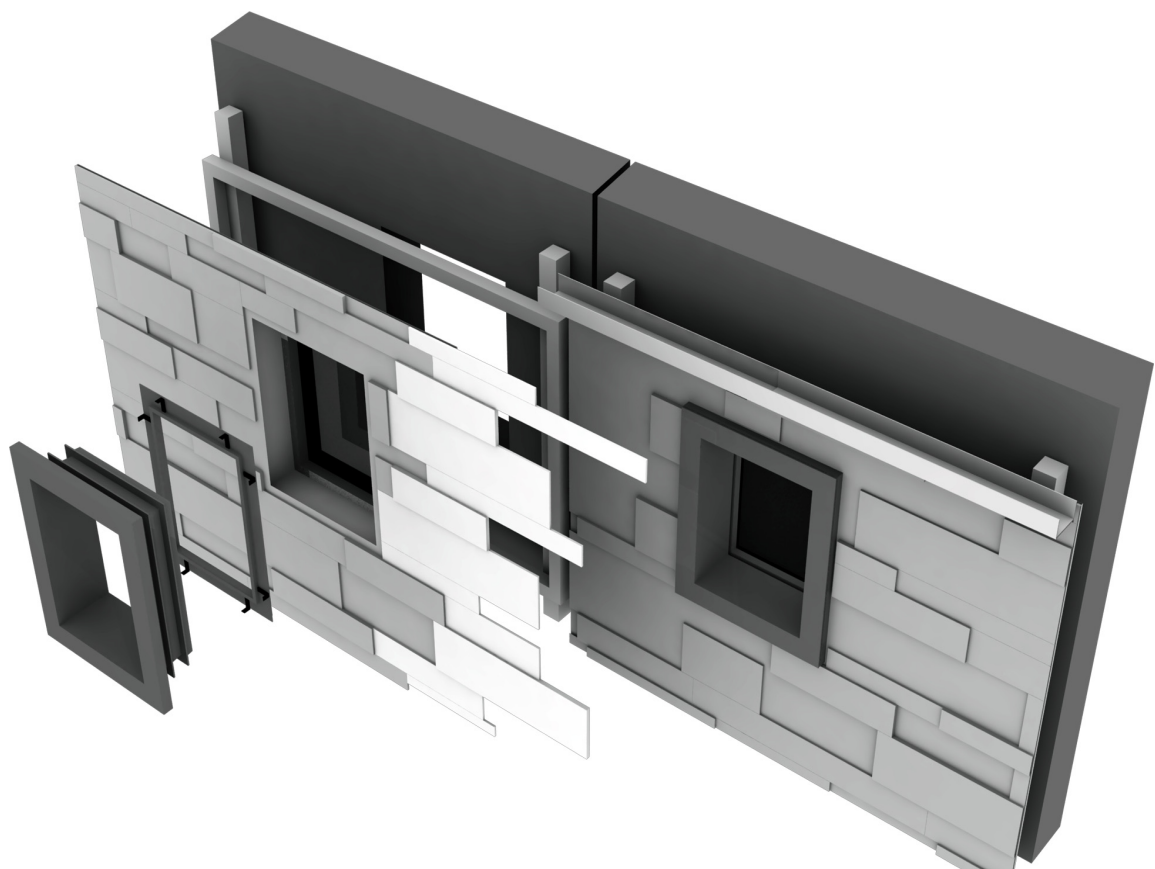


Abbildung 71: Explosionszeichnung des Fassadensystems²¹³

Der Ablauf der Montage erfolgt in drei Hauptabschnitten: Als erstes werden die Fassadenmodule an der bestehenden Gebäudeaußenwand befestigt. Danach werden die Fugen zwischen zwei Fassadenmodulen mit Fugendeckelementen ge-

²¹² Vgl. Bergmann et al (2008): Entwicklung eines Fassadensystems, S. 95 ff.

²¹³ Ebenda, S. 95

schlossen. Im dritten Montageschritt werden die Öffnungen mit Einsetzelementen verkleidet. Für die Montagesimulation wurde die Montage der Fassadenmodule ausgewählt, da hier das Zusammenspiel von Montage und Logistik beispielhaft modelliert werden kann.

Hier wird der in Abbildung 72 dargestellte Ablauf zum Transport und der Montage der Fassadenmodule an der bestehenden Außenwand betrachtet. Die Montage der Fassadenmodule erfolgt durch einen einzelnen Monteur, der auf einer Gelenkarbeitsbühne arbeitet. Er wird von einem Teleskopstapler unterstützt, der die Fassadenmodule mit einem Montagerahmen aufnimmt, zum Montageort transportiert und dort in der Montageposition fixiert. Die Aufgabe des Monteurs besteht dann darin, die Befestigungspunkte des Fassadenmoduls mit speziellen Dübeln im Mauerwerk zu befestigen. Dabei hält der Teleskopstapler das Fassadenmodul solange, bis es sein Eigengewicht über die Dübel in die Wand abtragen kann.²¹⁴ Für die Montagesimulation wird pro Herstellung eines der insgesamt zwölf Befestigungspunkte je Fassadenmodul eine durchschnittliche Grundzeit von fünf Minuten angenommen.

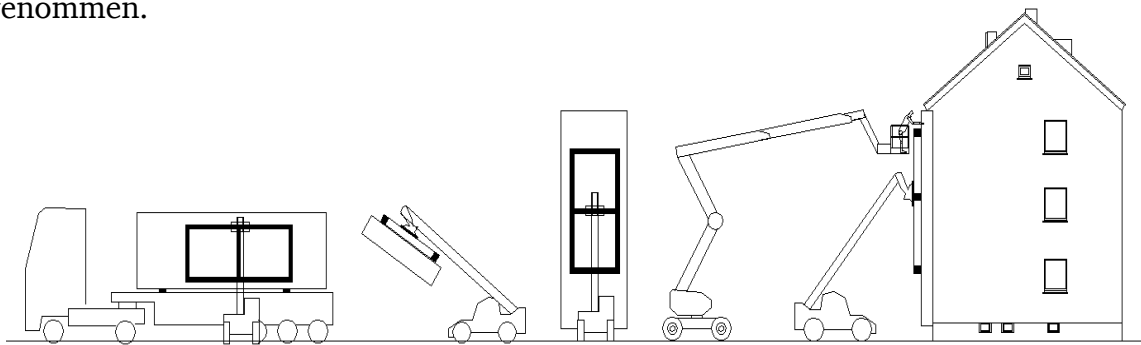
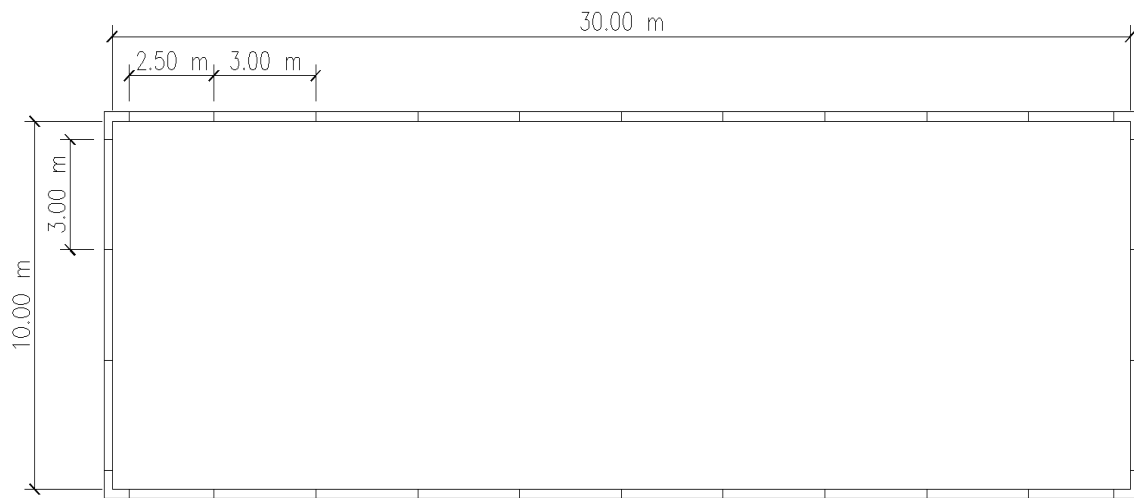


Abbildung 72: Prozesse zur Montage der Fassadenmodule

Für das Anwendungsbeispiel zur Simulation der Montage des Fassadensystems wurde ein Gebäude mit einer Länge von 30 Metern und einer Breite von 10 Metern gewählt. Damit lässt sich das modulare Fassadensystem, wie in Abbildung 73 dargestellt, aus 30 gebäudehohen Fassadenmodulen zusammensetzen. Dabei werden fünf unterschiedliche Typen von Fassadenmodulen unterschieden. Dies sind die Eck- und Giebelmodule an der Querseite des Gebäudes und die Rand-, Standard- und Türmodule an der Gebäudelängsseite.

²¹⁴ Vgl. Bergmann et al (2008): Entwicklung eines Fassadensystems, S. 111 ff.

Abbildung 73: Gebäudegrundriss mit 30 Fassadenmodulen²¹⁵

6.3 Stufe 1: Aufstellen eines baubetrieblichen Multiagentenmodells der Fassadenmontage

Die praktische Problemstellung besteht in der Implementierung eines lauffähigen Modells der Fassadenmodulmontage unter Berücksichtigung aller maßgebenden Einflüsse. Neben dem Transport auf der Baustelle und der Befestigung des Fassadenmoduls mit zwölf Dübeln an der Außenwand sind weitere Aspekte von Bedeutung. Die Zusammenarbeit und die Eigenschaften der Monteure und Baugeräteführer, welche die Teleskopstapler bedienen, sind zu modellieren. Außerdem ist die Ergonomie der Montagearbeiten ohne Witterungsschutz abzubilden und mit dem Arbeitssystem und den Vorgabezeiten nach REFA zu verknüpfen.

6.3.1 Modellbildung entsprechend dem Vorgehensmodell

Das REFA-Arbeitssystem der Fassadenmodulmontage hat die Aufgabe, das Fassadenmodul an der Anlieferstelle aufzunehmen und an der Gebäudeaußenwand zu befestigen. Aus dem Arbeitssystem nach REFA wird entsprechend Kapitel 4.4 die Spezifikation und Implementierung des Multiagentenmodells der Montage abgeleitet.

²¹⁵ Eigene Darstellung

Im Arbeitssystem sind zwei Menschen beschrieben: Ein Monteur, der die Fassadenmodule von einer Arbeitsbühne aus an der Außenwand befestigt, und ein Baugeräteführer, der das Transportgerät steuert. Diese werden im Multiagentenmodell als zwei unterschiedliche Agentenklassen implementiert und erhalten ein Verhalten entsprechend dem im Arbeitssystem beschriebenen Arbeitsablauf. Als Betriebsmittel sind ein Teleskopstapler und eine Gelenk-Teleskoparbeitsbühne zu nennen, die den beiden Agentenklassen zugeordnet werden.

Der Arbeitsablauf beim Transport und der Befestigung eines Fassadenmoduls ist in Abbildung 74 als Folge von Arbeitsablaufabschnitten dargestellt, bei denen sich Monteur und Teleskopstapler abwechseln. Daraus ergeben sich das Verhaltensmuster der beiden Agentenklassen und die Notwendigkeit der indirekten Kommunikation innerhalb der Montagekolonne.

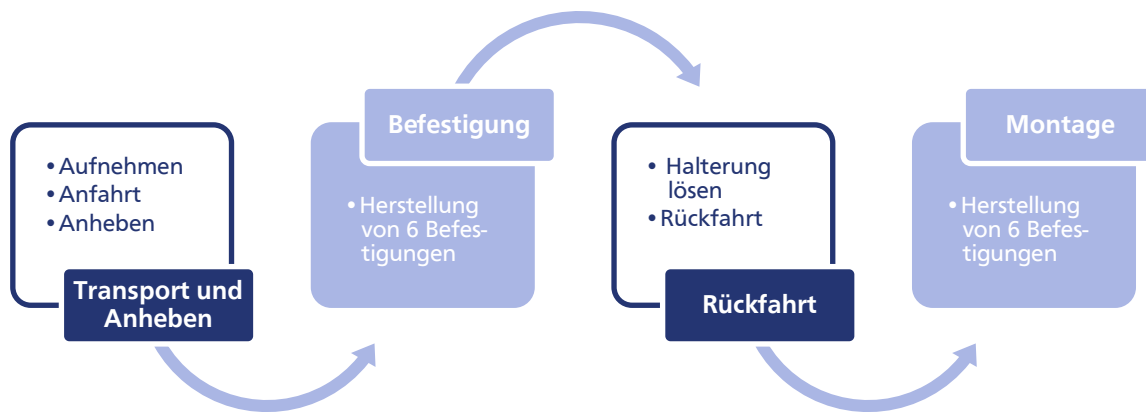


Abbildung 74: Arbeitsablauf bei Transport und Befestigung eines Fassadenmoduls

Aus dem abstrakten REFA-Arbeitsablauf kann entsprechend Abschnitt 4.4.1 ein Agentenverhalten als UML-Aktivitätsdiagramm spezifiziert werden, das dann in SeSAM-IMPL implementiert werden kann. Die Kombination aus SeSAM-UML und SeSAM-IMPL für das Verhalten eines Montageagenten ist in Abbildung 75 dargestellt. Neben der oben dargestellten Befestigung und Montage gibt es auch noch die Anfahraktivität, um den Montageort zu erreichen, sowie Aktivitäten zur Implementierung der Ergonomie und direkten Kommunikation.

Die Absprache innerhalb der Kolonne erfolgt, wie in Abschnitt 4.4.2 beschrieben, über indirekte Kommunikation. Der Sender manipuliert dabei die booleschen Variablen des Fassadenmoduls, während der Empfänger das Fassadenmodul und dessen Variablen beobachtet. Die Befestigung beginnt, sobald sich der Monteur und sein Montageobjekt am gleichen Ort befinden und die Variable „Transportiert“ des Fassadenmoduls vom Stapler auf *WAHR* gesetzt wurde. Während der Montage hält der Teleskopstapler das Fassadenmodul solange, bis der Monteur die Variable „Befestigt“ auf *WAHR* setzt.

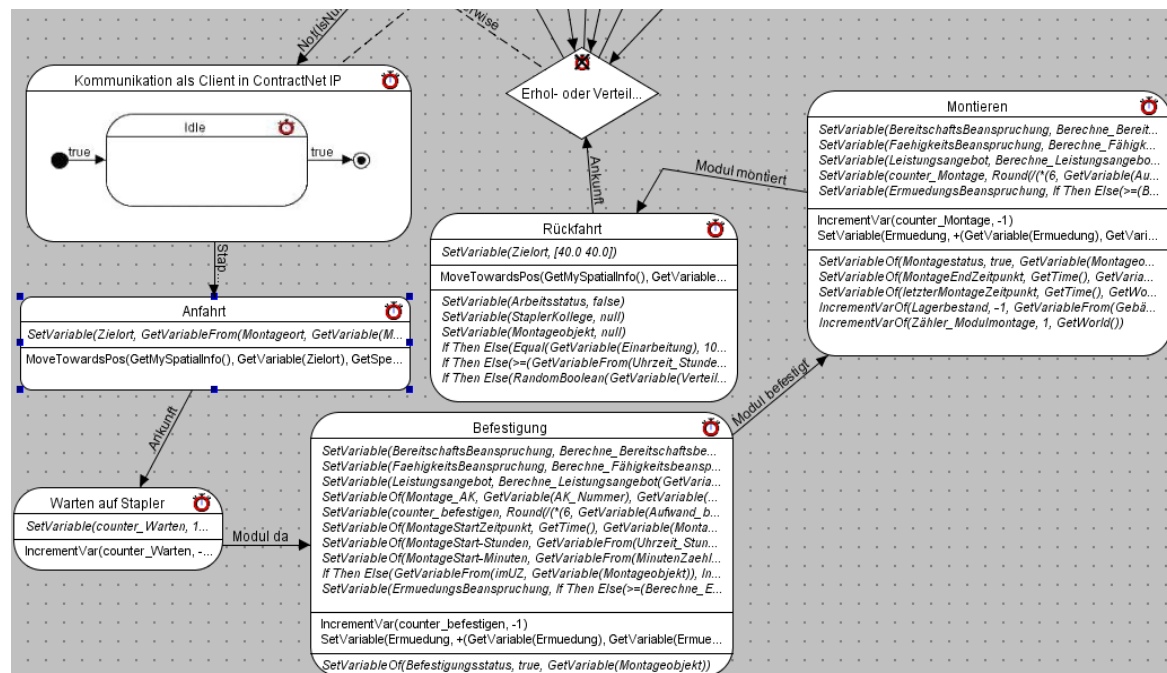


Abbildung 75: Spezifikation und Implementierung des Verhaltens des Monteurs zur Fassadenmodulmontage in SeSAM

Die Eingabe des Arbeitssystems besteht aus Fassadenmodulen, von denen vier Stück pro LKW auf die Baustelle geliefert werden. Sie werden in SeSAM als passive Ressourcen implementiert, von denen die Umwelt zur Abbildung der Anlieferung per LKW an der Anlieferstelle jeweils vier Stück gleichzeitig erzeugt. Dabei hat jedes Fassadenmodul neben seinen oben beschriebenen Zustandsvariablen auch einige feststehende Eigenschaften, wie Typ und Montageort, die bei der Erzeugung zugewiesen werden. Da die Montage eines Fassadenmoduls nur neben einem bereits montierten Fassadenmodul möglich ist, kann, ausgehend von einer Gebäudeecke, stets nur in zwei Richtungen montiert werden. Um dies umzusetzen, wird im und gegen den Uhrzeigersinn festgehalten, welches Fassadenmodul zuletzt montiert wurde und die Anlieferung entsprechend dem jeweiligen Lagerbestand gesteuert.

Als Ausgabe liefert das Arbeitssystem montierte Fassadenmodule. Der diesbezügliche Baufortschritt kann im Modell an einer Zählvariablen abgelesen werden, die der Montageagent jedes Mal inkrementiert, wenn die Montage eines Fassadenmoduls abgeschlossen wurde.

Als letztes Element des Arbeitssystems ist die Umwelt zu betrachten. Deren räumliche Ausdehnung wird durch die Umwelt repräsentiert, in der sich auch das Gebäude befindet. Die weiteren modellierten Umwelteinflüsse betreffen die Leistungsfähigkeit sowie Erhol- und Verteilzeiten und werden größtenteils durch das Vorgehensmodell allgemeingültig vorgegeben. Die Konkretisierung der Einfluss-

faktoren findet dann während der Aufstellung der Szenarien statt. Allerdings werden bei der konkreten Modellierung die Standardwerte definiert. Für die durchschnittliche Arbeitskraft werden dabei Motivation und Qualifikation sowie die physische und psychische Belastbarkeit auf 100% gesetzt. Die Einarbeitung steigt entsprechend den allgemeinen Ausführungen binnen fünf Montagen von 50% auf 100% an. Der Lernfortschritt setzt sich einer potentiellen Funktion folgend mit jeder Tätigkeitswiederholung fort, wobei mangels tragfähiger Daten für Monteur und Stapler die Standardwerte verwendet werden. Für die Montage eines Fassadenmoduls beträgt die Qualifikationsanforderung 100%, während die ermüdende Belastung aus der Arbeitsaufgabe je nach Arbeitsschritt umgerechnet bei 204% respektive 44% liegt.²¹⁶ Die ermüdende Arbeitsbelastung aus dem Transport der Fassadenmodule beträgt dagegen 110%. Für die Belastung aus Temperatur und Tagesrhythmik werden die Berechnungsansätze entsprechend Abschnitt 4.3.2.1 sowie deren Spezifikation und Implementierung aus Abschnitt 4.4.4 übernommen.

Um die flexible Bildung von Kolonnen zu ermöglichen, ist eine direkte Kommunikation der Agenten untereinander erforderlich. Denn flexible Transportvereinbarungen ermöglichen eine optimale Ressourcennutzung, statt der fixen Zuordnung von Monteur und Teleskopstapler. Dies wird, wie im Vorgehensmodell in Abschnitt 4.4.2 beschrieben, mit dem FIPA-ContractNet Interaction Protocol sowie dem Kommunikationsplugin von SeSAM umgesetzt.

6.3.2 Systematische Qualitätssicherung des Modells der Fassadenmodulmontage

Ein baubetriebliches Modell zur Termin- und Ressourcenplanung darf keine systematischen Fehler bei der Modellierung der Prozesse aufweisen. Ziel der Verifikation, Validierung und Justierung des Multiagentenmodells von Montageprozessen ist daher die Überprüfung, ob das Modell plausible Werte liefert und praxistaugliche Aussagen ermöglicht. Der Einsatz entsprechender Techniken auf Basis des Vorgehensmodells wird im Folgenden für das agentenbasierte Modell der Montageprozesse für Fassadenmodule beschrieben und kritisch hinterfragt.

Die Plausibilitätsprüfung während der Modellierung der Fassadenmodulmontage erfolgte zum einen über die Animation der Transport- und Montageprozesse und zum anderen durch die parallele Betrachtung des Verlaufs einzelner Variablen. Die Animation der Bewegungen und die visuelle Beobachtung des Status der ein-

²¹⁶ Vgl. Kaiser (2009): Einflüsse der Ergonomie auf Vorgabezeiten im Baubetrieb, S. 85

zelen Agenten und Ressourcen ermöglicht das Erkennen von Fehlern in der Abfolge der Tätigkeiten. So ist in Abbildung 76 einen Monteur abgebildet, der gemeinsam mit dem Stapler ein Fassadenmodul an der Außenwand befestigt, während ein zweiter Monteur darauf wartet, dass der Stapler für ihn einen Transportauftrag ausführt.

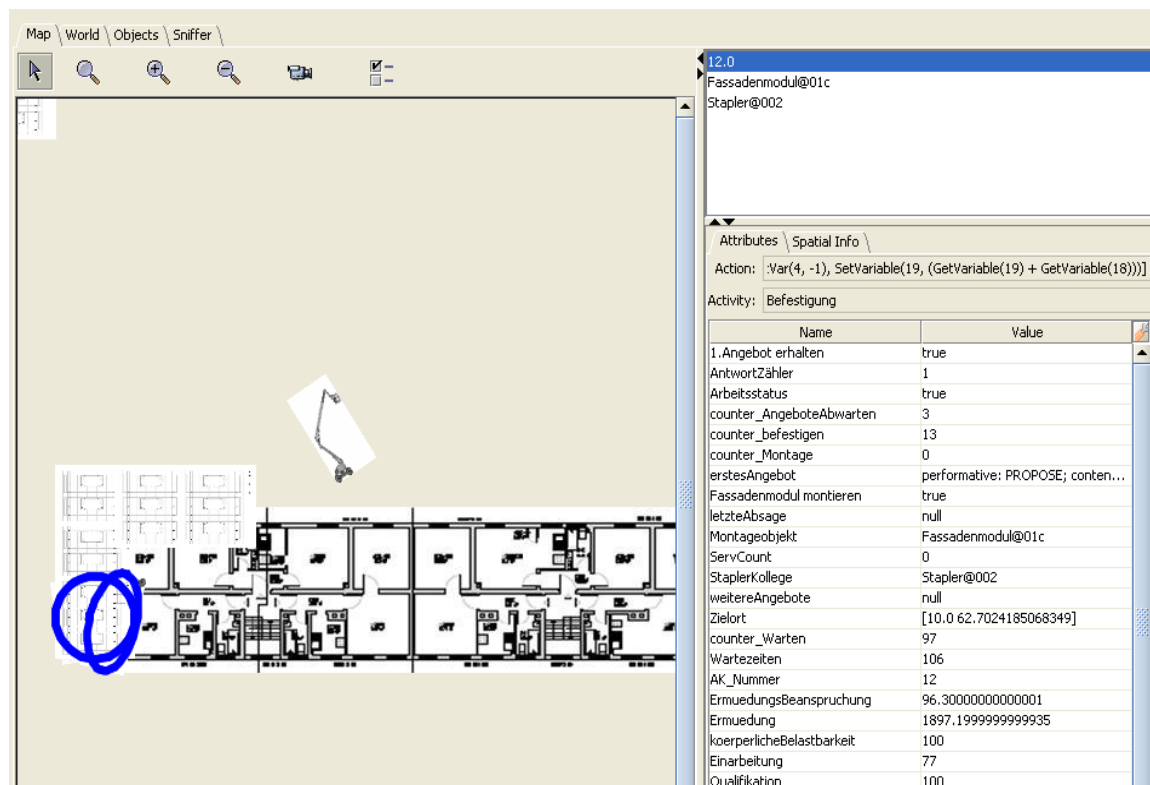


Abbildung 76: Bildschirmfoto der Animation eines Simulationsexperiments mit dem agentenbasierten Modell der Fassadenmontage

Die Analyse des Verlaufs einzelner Parameter ist dagegen gerade zur Überprüfung der Umsetzung des ergonomischen Modells hilfreich. Der Ablauf einer solchen Plausibilitätsprüfung kann anhand des Graphen in Abbildung 77 der Ermüdung eines Monteurs erläutert werden. Die Anstiege der Ermüdung werden durch die Befestigung jeweils eines Elementes hervorgerufen, wobei die Befestigungsdauer und damit auch die hervorgerufenen Ermüdung infolge des Einarbeitungseffekts zunächst sinken. Die auf den Anstieg folgende Stagnation der Ermüdung lässt sich auf die weniger ermüdende Endmontage der Elemente zurückführen, und der Abfall bis knapp unter null wird durch Erholpausen bewirkt. Im weiteren Verlauf erkennt man, dass die Erholpausen zufallsgesteuert erfolgen, wobei mit zunehmender Ermüdung die Wahrscheinlichkeit einer Pause steigt.

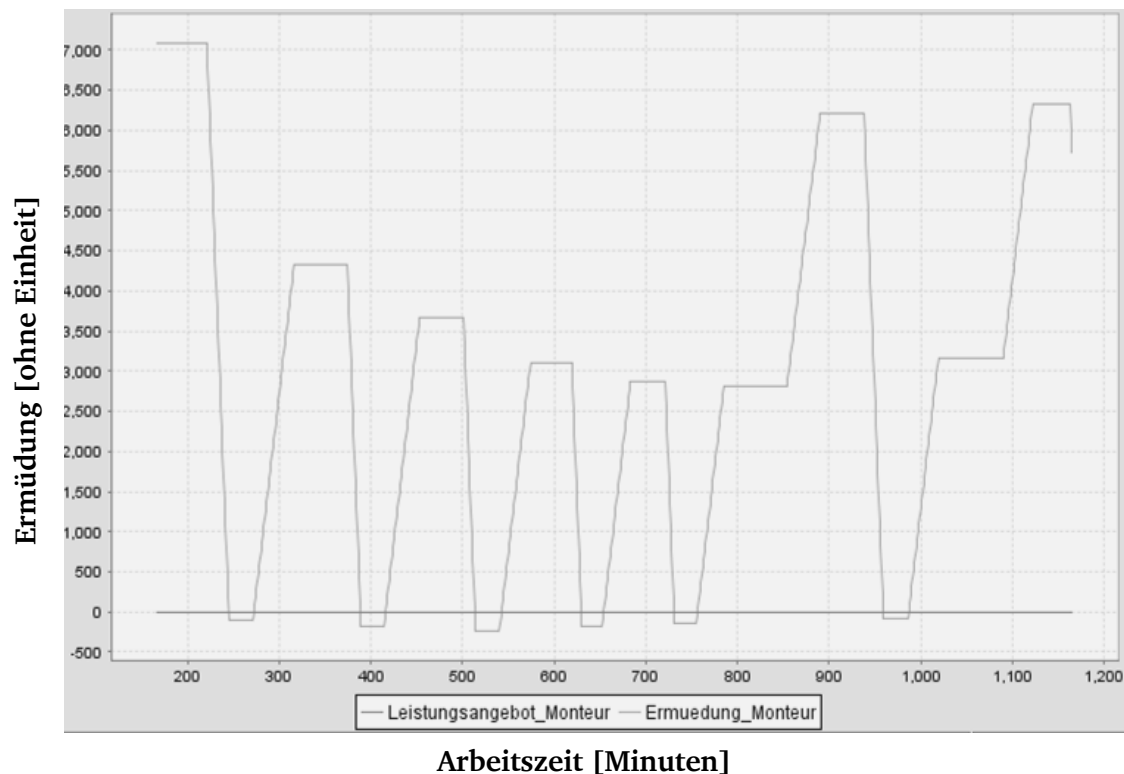


Abbildung 77: Zeitlicher Verlauf der Ermüdung einer Arbeitskraft infolge Arbeitsbelastungen und Erholpausen

Im Folgenden werden in Tabelle 17 beispielhaft die Ergebnisse eines Plausibilitäts-tests über den Einfluss von fünf Variablen auf die Gesamtdauer dargestellt. Dabei wird zunächst die Gesamtdauer für den Standardwert bestimmt und danach je ein Experiment gestartet, bei dem die Variable beim Monteur bzw. den Fassadenmodulen oder der Umwelt so verändert wurde, dass sich eine längere Gesamtdauer ergeben müsste.

Zustandsvariable	Standardwert		Extremwert	
	Wert	Dauer	Wert	Dauer
Belastbarkeit	100%	3563	80%	3608
Motivation	100%		80%	4214
Fähigkeitsbeanspruchung	100%		120%	4253
Erholungswert	550		200	3690
Maximale Temperatur	20° C		0 °C	4951

Tabelle 17 : Einfluss einzelner Zustandsvariable auf die Gesamtdauer

Eine Überprüfung der korrekten Montagedauern ohne Ermüdungsbelastungen und bei üblicher Motivation und erforderlicher Qualifikation erfolgt mit nachfolgendem Diagramm in Abbildung 78. Die Auswirkungen des Einarbeitungseffekts und der Tagesganglinie auf die Montagedauer eines Elements sind deutlich er-

kennbar. Rechnet man sie heraus, so erhält man direkt die vorgegebene theoretische Grundzeit von 60 Minuten für die Montage eines Fassadenmoduls.

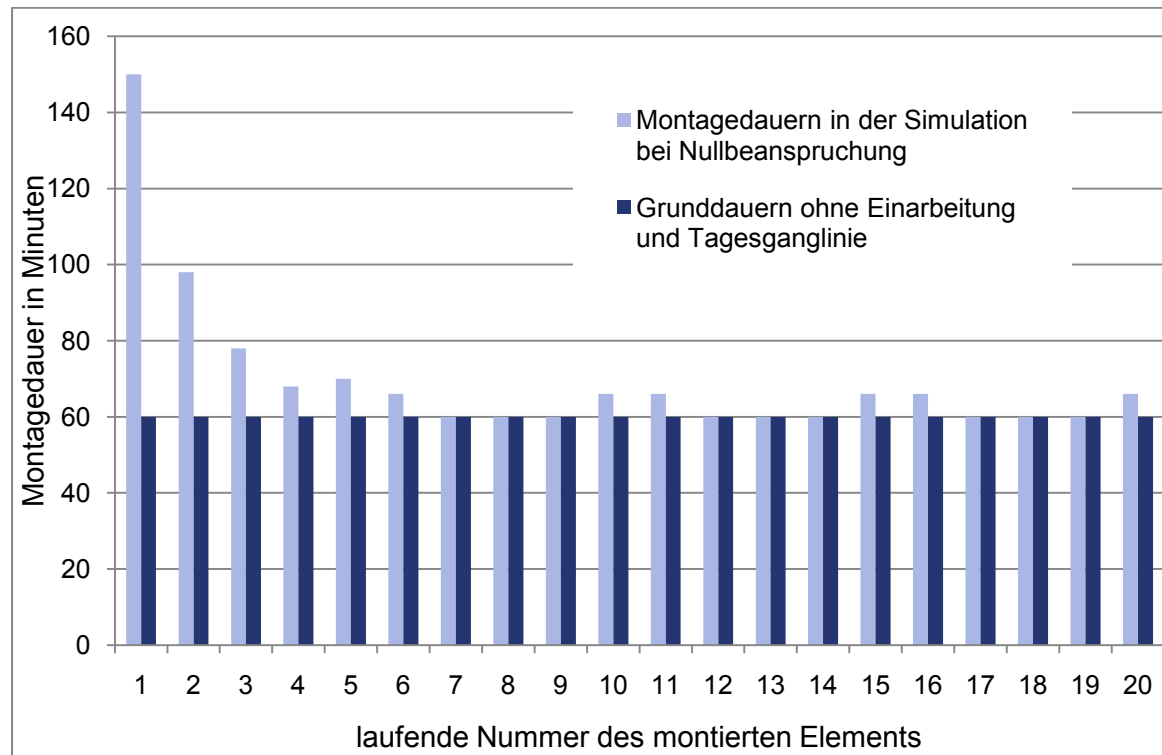


Abbildung 78: Gegenüberstellung der Simulationsergebnisse mit den Grunddauern

Die Überprüfung der Lernkurve erfolgt durch Vergleich der händisch berechneten Verlängerung der Gesamtdauer infolge der geringeren Montageleistung eines ungeübten Monteurs entsprechend der Lernkurve mit dem Simulationswert. Dazu wurde die Differenz der Montagedauern zwischen einem Monteur mit einer Erfahrung von 5000 Montagen und einem Anfänger ohne Montageerfahrung mit der Formel nach de Greiff bestimmt. Im Säulendiagramm in Abbildung 79 werden die Rechenwerte mit den Ergebnissen entsprechender Simulationsexperimente gegenübergestellt, und es wird deutlich, dass sich die Abweichungen im tolerierbaren Bereich bewegen.

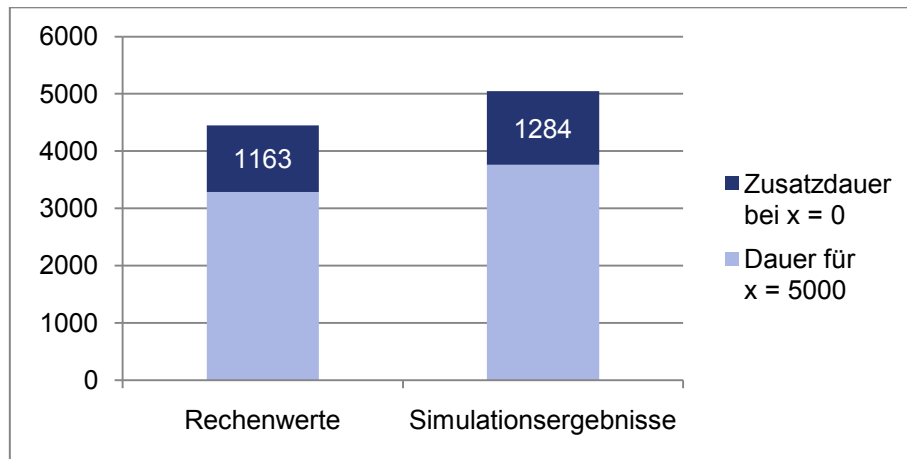


Abbildung 79: Vergleich der Simulationsergebnisse und Rechenwerte hinsichtlich des Lernfortschritts

Das Diagramm in Abbildung 80 zeigt, dass sich für den Wert $t = 1,4$ insbesondere bei extrem niedrigen Temperaturen eine sehr gute Annäherung des Simulationsergebnisses an die in Abschnitt 4.3.2.1 beschriebenen empirischen Werte nach Fetzner ergibt. Die Abweichung der Simulationsergebnisse von den empirischen Vorgaben bei extrem hohen Temperaturen kann u.a. damit begründet werden, dass die stärkere Ermüdung häufigere Erholpausen nach sich zieht, die wiederum den Einfluss der Ermüdung auf das Leistungsangebot minimieren. Das höhere Leistungsangebot reduziert dann die Montagedauer und gleicht die längeren Erholzeiten zum Teil aus. Erst bei den höheren Temperaturbelastungen im Frost tritt dieser Effekt in den Hintergrund.

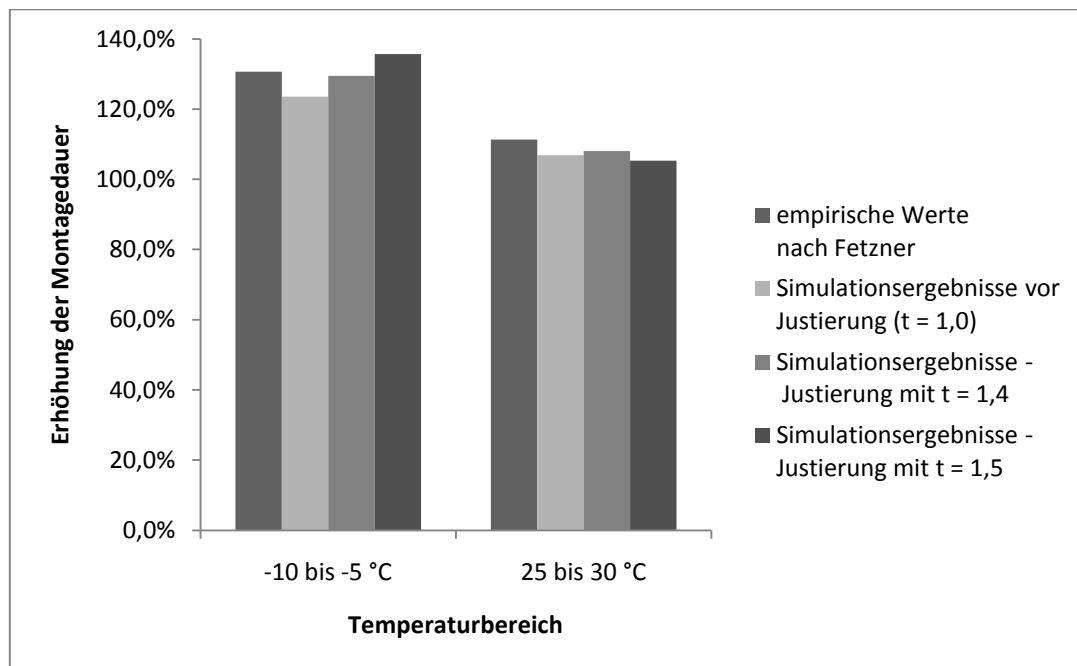


Abbildung 80: Prozentuale Veränderung der Montagedauer gegenüber der Dauer bei 15 bis 20°C im Rahmen der Justierung der Temperaturbelastung mit dem Faktor t

Wie im Diagramm in Abbildung 81 dargestellt, ergeben sich bei Variation der Eigenschaften der Arbeitskraft sowie der Ermüdungsbelastungen die in Abschnitt 4.5.3.3 beschriebenen Auswirkungen auf die Gesamtdauer und deren Bestandteile. Bei Standardbeanspruchung macht die Grundzeit der Montage etwa die Hälfte der Gesamtdauer aus. Den zweitgrößten Anteil haben die Zeiten für den Transport der Elemente und die hierfür notwendige Kommunikation zwischen Monteur und Transporteräteführer. Die Erholzeit entspricht einem Zehntel der Grundzeit, und die tatsächliche Montagedauer ist infolge der Minderung des Leistungsangebots durch unterschiedlichste ergonomische Einflussfaktoren um etwa ein Fünftel höher als die Grundzeit ohne Einflüsse.

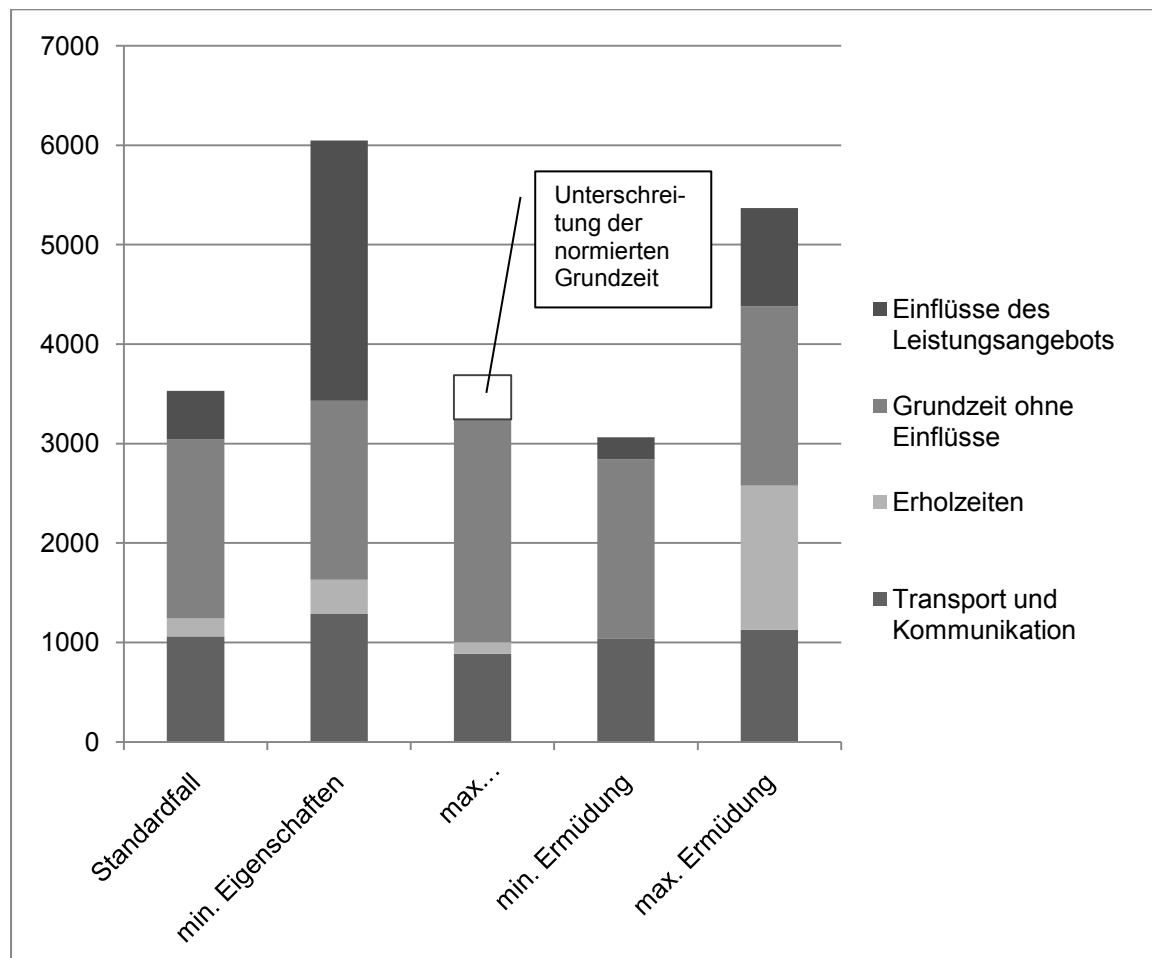


Abbildung 81: Aufteilung der Gesamtdauer der Fassadenmontage bei Szenarien mit unterschiedlichen ergonomischen Einflussfaktoren

Für die Zusatztätigkeiten wurde für alle Arbeitskräfte eine Wahrscheinlichkeit von 50% je Montagezyklus festgelegt. Um einen Anteil der Zusatztätigkeiten von 10% bezogen auf die Grundmontagezeit zu erhalten, liegt die Dauer für Montageagenten bei 12 Minuten. Aufgrund der vielfältigen Einsetzbarkeit wird beim Teleskopstapler im Vergleich die Dauer der Zusatztätigkeit auf den doppelten Wert gesetzt. Die im Experiment ermittelten Dauern der Zusatztätigkeiten bei der Montage von 30 Fassadenmodulen sind in den Abbildungen 82 bis 84 dargestellt. Sie liegen innerhalb der zu erwartenden stochastischen Streuung.

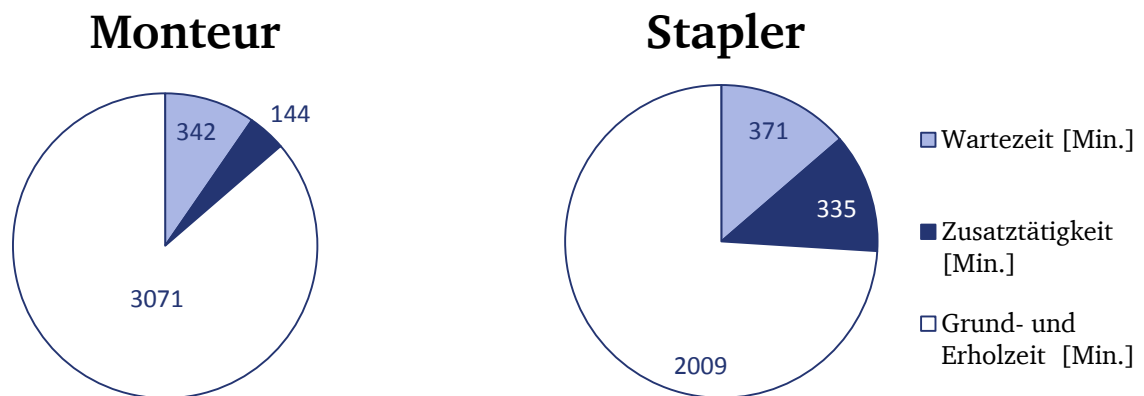


Abbildung 82: Anteil der Zusatztätigkeiten und Wartezeiten an der Gesamtdauer bei einer Kolonne bestehend aus einem Monteur und einem Stapler

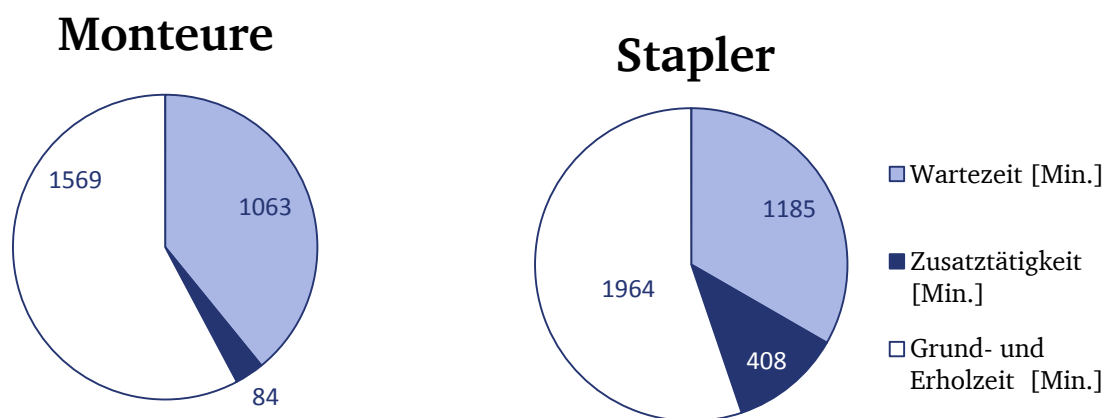


Abbildung 83: Anteil der Zusatztätigkeiten und Wartezeiten an der Gesamtdauer bei einer Kolonne bestehend aus zwei Monteuren und einem Stapler

Auch die Auswirkung der Zusatzdauern, entsprechend der Wartezeiten der Agenten bei unterschiedlicher Kolonnenzusammensetzung, entspricht den in Abschnitt 4.5.3.4 formulierten Erwartungen. Generell sorgt der zusätzliche Monteur für eine schnellere Montage, und bezogen auf die Zusatztätigkeiten ist im ersten Fall die Zusatztätigkeit des Monteurs maßgebend für die Gesamtdauer, während im zweiten Fall die Zusatztätigkeiten des voll ausgelasteten Staplers zum Tragen kommen.

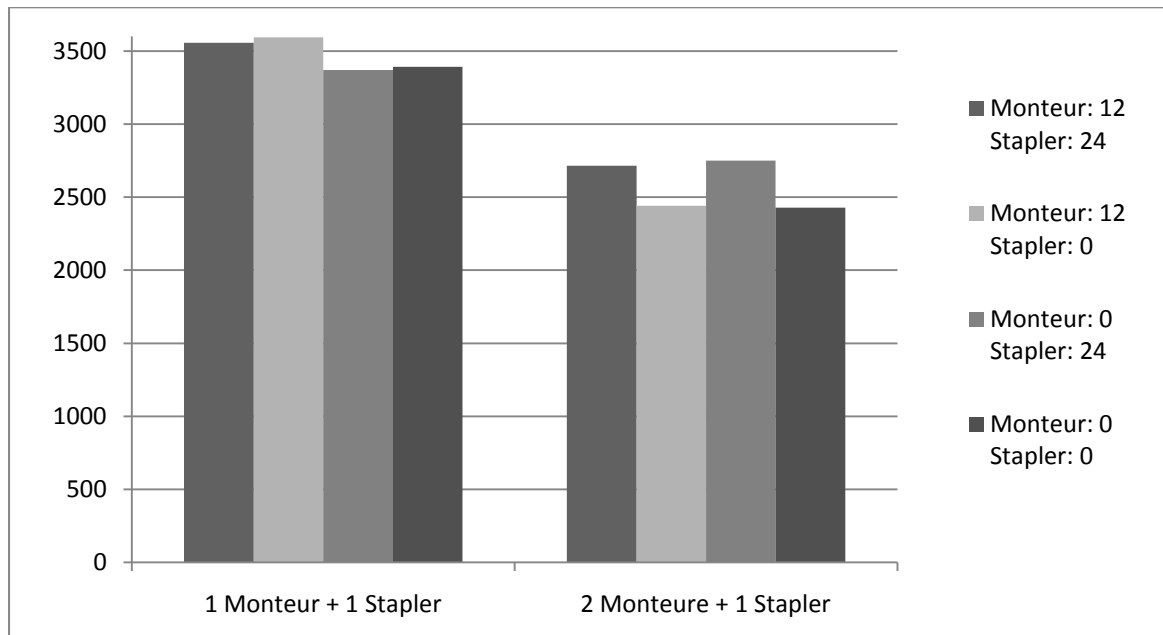


Abbildung 84: Veränderung der Gesamtdauer mit und ohne Zusatzdauern bei verschiedenen Kolonnenzusammensetzungen

6.4 Stufe 2: Simulation der Montagearbeiten im Rahmen der Arbeitsvorbereitung für eine Fassadenmontage

Als Anwendungsbeispiel für den Einsatz der Multiagentensimulation in der Termin- und Ressourcenplanung vor Beginn der Bauarbeiten wird die Fassadenmontage an einem typischen Wohngebäude der fünfziger Jahre durchgespielt. Das Gebäude besitzt eine rechteckige Grundfläche von 10 mal 30 Metern, die Außenwand hat eine Höhe von etwa 10 Metern. Insgesamt sind 30 gebäudehohe Fassadenmodule zu montieren.

Für die Planung von Terminen und Ressourcen in der Arbeitsvorbereitung soll eine optimale Kolonnenbesetzung aus einem bestehenden Pool von Monteuren ermittelt werden. Außerdem soll eine Analyse der Witterungseinflüsse auf die Bauzeit erfolgen, wobei statistische Temperaturwerte bezogen auf den Monat April sowie das ganze Jahr zugrunde gelegt werden.

Die Transportlogistik zur Baustelle ist nicht Bestandteil der Betrachtung und wird als bedarfsgerecht und störungsfrei angenommen. Für die Logistik auf der Baustelle steht ein Teleskopstapler mit durchschnittlichen ergonomischen Eigenschaften des Baugeräteführers zur Verfügung.

6.4.1 Aufstellung der Szenarien

Beim Aufstellen der Szenarien sollen zum einen alle Optionen zum Einsatz von ein oder zwei Monteuren aus einem Pool von insgesamt vier Stereotypen von Bauarbeitskräften für Montagearbeiten berücksichtigt werden. Zum anderen sollen die im Monat April bzw. über das ganze Jahr zu erwartenden Witterungseinflüsse angesetzt werden, wozu die 5%-, 20%-, 80%- und 95%-Quantile sowie der Mittelwert der Temperatur verwendet werden.

Die Modellierung der Temperatur während der Arbeitszeit erfolgt mittels einer Morgen- und einer Tagestemperatur, zwischen denen es im Modell um 10:00 Uhr einen sprunghaften Temperaturanstieg gibt. Die verwendeten Tagestemperaturen der statistischen Werte für den Monat April und das gesamte Jahr sind zusammen mit der Temperaturdifferenz „ Δ Temp“ in der untenstehenden Tabelle 18 angegeben.

	5%-Quantil	20%-Quantil	Mittelwert	80%-Quantil	95%-Quantil	Δ Temp
April	7,6°C	10,3°C	13,7°C	17,2°C	20,8°C	5,1°C
Jahr	1,4°C	6,6°C	13,5°C	20,6°C	25,4°C	6,4°C

Tabelle 18: Statistische Temperaturwerte für die Szenarien der Fassadenmontage

Unter den vier Stereotypen der Monteure befinden sich zwei Facharbeitskräfte mit unterschiedlichem Erfahrungsschatz sowie zwei ungelernte Hilfskräfte, von denen sich einer durch besonders hohe Motivation und physische Belastbarkeit auszeichnet. Die Werte dieser Stereotypen werden in Tabelle 19 aufgelistet.

Typus	Physische Belastbarkeit	Psychische Belastbarkeit	Motivation	Qualifikation	Erfahrung
F2	100	100	100	110	10
F5	100	100	100	110	500
H2	100	100	100	80	10
H7	150	100	120	80	10

Tabelle 19: Stereotypen von Bauarbeitskräften mit Eigenschaftswerten

Aus den zehn möglichen Kombinationen zum Ressourceneinsatz und den fünf Temperaturverläufen mit unterschiedlicher Wahrscheinlichkeit ergeben sich für den April respektive für das ganze Jahr je 50 Szenarien der Fassadenmontage. Diese sind in Tabelle 20 zusammengestellt.

		5%-Quantil	20%-Quantil	Mittelwert	80%-Quantil	95%-Quantil
Fach-AK2		F2_T-2	F2_T-1	F2_T+0	F2_T+1	F2_T+2
Fach-AK2	Fach-AK5	F2+F5_T-2	F2+F5_T-1	F2+F5_T+0	F2+F5_T+1	F2+F5_T+2
Fach-AK2	Hilfs-AK2	F2+H2_T-2	F2+H2_T-1	F2+H2_T+0	F2+H2_T+1	F2+H2_T+2
Fach-AK2	Hilfs-AK7	F2+H7_T-2	F2+H7_T-1	F2+H7_T+0	F2+H7_T+1	F2+H7_T+2
Fach-AK5		F5_T-2	F5_T-1	F5_T+0	F5_T+1	F5_T+2
Fach-AK5	Hilfs-AK2	F5+H2_T-2	F5+H2_T-1	F5+H2_T+0	F5+H2_T+1	F5+H2_T+2
Fach-AK5	Hilfs-AK7	F5+H7_T-2	F5+H7_T-1	F5+H7_T+0	F5+H7_T+1	F5+H7_T+2
Hilfs-AK2		H2_T-2	H2_T-1	H2_T+0	H2_T+1	H2_T+2
Hilfs-AK2	Hilfs-AK7	H2+H7_T-2	H2+H7_T-1	H2+H7_T+0	H2+H7_T+1	H2+H7_T+2
Hilfs-AK7		H7_T-2	H7_T-1	H7_T+0	H7_T+1	H7_T+2

Tabelle 20: Szenarien für die Fassadenmontage in einem definierten Zeitraum

6.4.2 Experimentation und Aufbereitung der Daten

Die Durchführung der Simulationsexperimente mit jedem der 50 Szenarien erfolgt in SeSAM. Hierbei werden während des Simulationsexperiments durch Analysefunktionen vorher definierte Parameter dokumentiert. Zugleich ist es möglich, eine Visualisierung des Ablaufs des Simulationsexperiments sowie die sich dabei verändernden Attribute der Agenten zu beobachten. Ein Screenshot der Darstellung des Ablaufs eines Simulationsexperiments in SeSAM ist in Abbildung 85 dargestellt.

Die erzeugten Simulationsergebnisse der einzelnen Szenarien liegen im Format CSV als kommaseparierte Werte vor und können einfach in Tabellenform zusammengetragen werden. Dabei können die in Minuten vorliegende Gesamtdauer sowie die Wartezeiten der einzelnen Arbeitskräfte in Arbeitsstunden umgerechnet und der Aufwandswert für jedes Szenario bestimmt werden. Auch ist es möglich, den Mittelwert und weitere statistische Kenngrößen über alle Szenarien zu ermitteln.

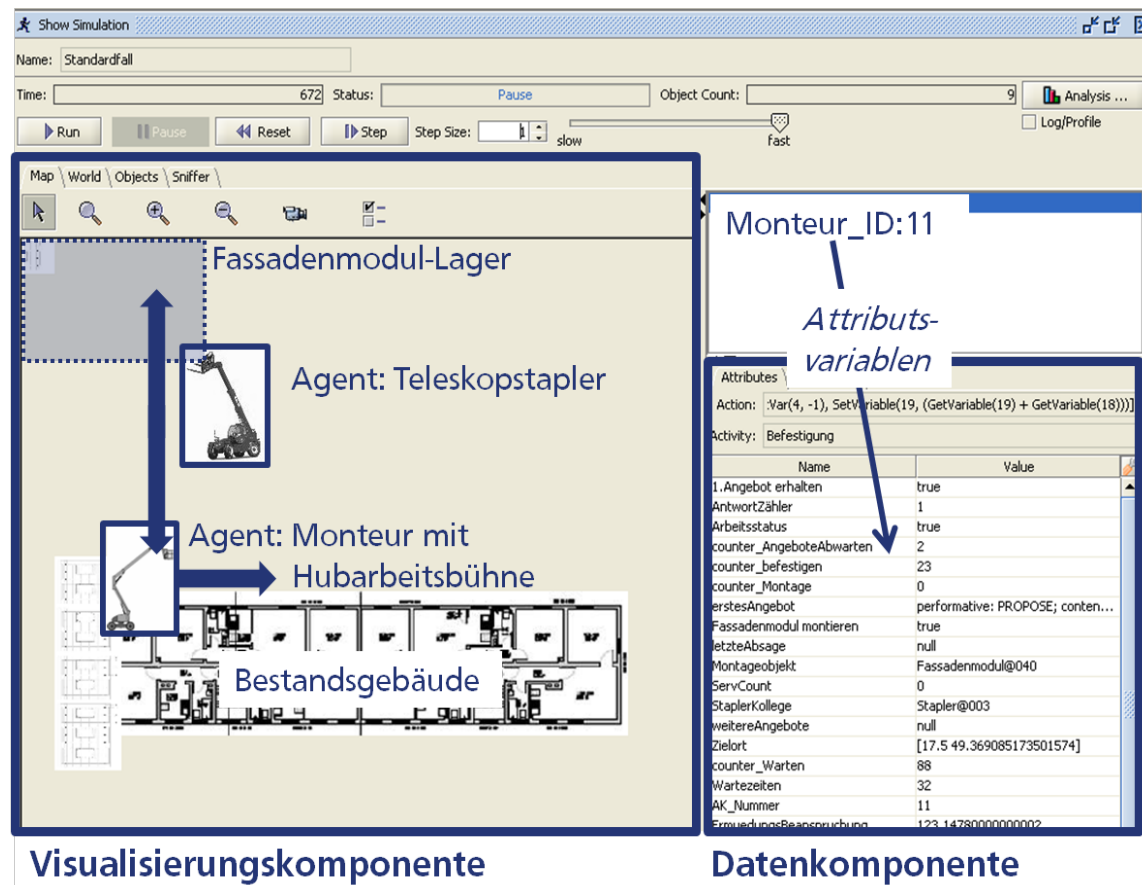


Abbildung 85: Darstellung eines Simulationsexperiments in SeSAM

Es wurden 50 Situationen aufgestellt, indem zehn Varianten des Ressourceneinsatzes mit fünf Temperaturszenarien kombiniert wurden. Die per Simulationsexperiment ermittelten Gesamtdauern jedes Szenarios in Minuten sind im Diagramm in Abbildung 86 dargestellt. Der Einfluss des unterschiedlichen Ressourceneinsatzes auf die Gesamtdauer ist erkennbar, aber auch die Bauzeitverlängerung bei den niedrigen Temperaturen des 5%-Quantils kann abgelesen werden.

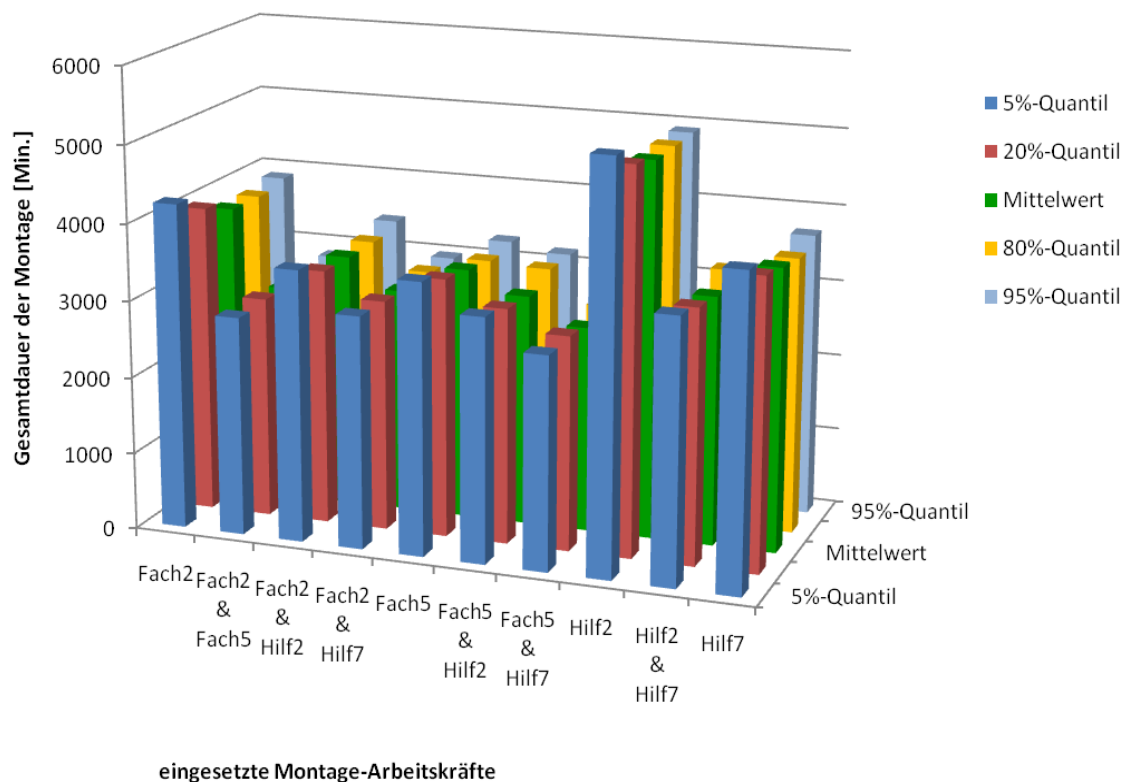


Abbildung 86: Gesamtdauer der Fassadenmontage bei 50 Szenarien

Die Simulationsergebnisse der zehn Szenarien des Ressourceneinsatzes für den Jahres-Mittelwert der Temperatur sowie die statistische Auswertung über aller Szenarien bezogen auf das gesamte Jahr sind in Tabelle 21 zusammengestellt.

6.4.3 Datenanalyse zur Optimierung und Risikobewertung

Durch die Möglichkeit, mit Simulationsexperimenten auf effiziente Weise eine Vielzahl von Szenarien für den Ressourceneinsatz durchzuspielen, ist die Optimierung des Ressourceneinsatzes möglich. Als Kennzahl für einen schnellen Baufortschritt kann dabei die Gesamtdauer in Stunden herangezogen werden. Sie ist bei der relativ kurzen Bauzeit für die Fassadenmodernisierung gegenüber der Dauer in Tagen zu bevorzugen, da die Tageswerte zufälligen Schwankungen unterliegen, die sich durch die lange Montagedauer je Fassadenmodul und die damit einhergehenden Schwankungen der täglichen Arbeitszeit ergeben. Der Aufwandswert ist dagegen ein Indikator für einen effizienten Einsatz der Arbeitskräfte, denn je geringer der Aufwandswert eines Szenarios ist, desto weniger Lohnstunden fallen pro Montage an. Darüber hinaus geben die Wartezeiten der einzelnen Arbeitskräfte darüber Auskunft, ob diese voll ausgelastet sind.

Szenario	Gesamtdauer	Wartezeit Monteur1	Wartezeit Monteur2	Wartezeit Stapler	Aufwands- wert	MaxTemp [°C]	Anzahl Monteure
F2_T+0	64	3	0	21	4,24	13,5	1
F2+F5_T+0	47	19	15	6	4,70	13,5	2
F2+H2_T+0	55	12	26	9	5,52	13,5	2
F2+H7_T+0	49	18	19	6	4,88	13,5	2
F5_T+0	55	4	0	18	3,65	13,5	1
F5+H2_T+0	50	17	21	5	5,02	13,5	2
F5+H7_T+0	45	13	21	4	4,46	13,5	2
H2_T+0	82	3	0	33	5,44	13,5	1
H2+H7_T+0	54	23	17	7	5,40	13,5	2
H7_T+0	61	3	0	19	4,09	13,5	1
statistische Werte über alle fünf Temperaturszenarien							
Mittelwert	57	12	1091	14	4,85		
5%-Quantil	46	3	683	5	3,69		
20%-Quantil	49	3	775	6	4,23		
80%-Quantil	63	19	1266	21	5,47		
95%-Quantil	82	23	1659	34	5,70		
Als Einheit wird die Arbeitszeit in Stunden, ggf. bezogen auf ein Fassadenmodul, verwendet.							

Tabelle 21: Simulationsergebnisse über das ganze Jahr und deren Auswertung

Eine Zusammenstellung der Simulationsergebnisse bei unterschiedlichem Ressourceneinsatz beim Jahres-Mittelwert der Temperatur findet sich in Tabelle 21. Markiert ist zum einen das Szenario, bei dem der Monteur-Stereotyp „F5“ zum Einsatz kommt, da hier der Aufwandswert minimal ist. Zum anderen ist das Szenario mit der minimalen Gesamtdauer markiert, bei dem die Monteur-Stereotypen „F5“ und „H7“ mit dem Stapler zusammenarbeiten. Während beim Einsatz von nur einem Monteur die Wartezeit des Monteurs minimal ist und der Stapler warten muss, kehrt sich dies beim Einsatz von 2 Monteuren um.

Die graphische Aufbereitung dieser Ergebnisse ist in Abbildung 87 dargestellt. Wie man erkennt, ist eine gleichzeitige Minimierung von Bauzeit und Aufwand nicht möglich. Attribuiert man die Ressourcen zusätzlich mit Kosten, so ist sogar von einer noch größeren Diskrepanz auszugehen, da besonders leistungsfähige Arbeitskräfte i.d.R. einen höheren Stundenlohn haben als weniger leistungsfähige Arbeitskräfte.

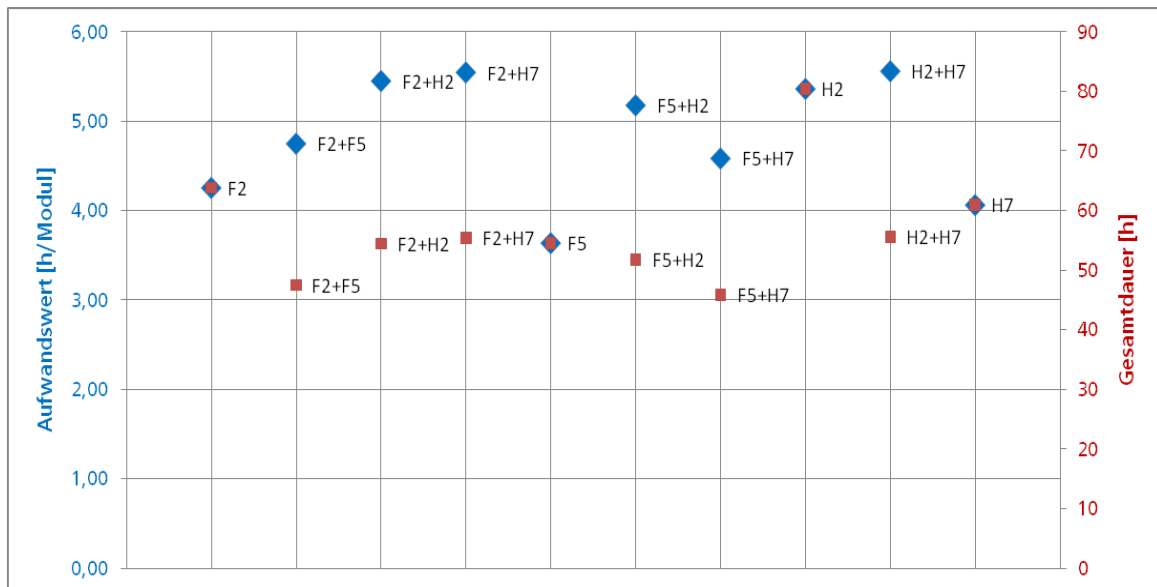


Abbildung 87: Gegenüberstellung des Aufwandswerts und der Gesamtdauer bei unterschiedlichem Ressourceneinsatz

Neben der Optimierung des Ressourceneinsatzes kann die Simulation mit dem in dieser Arbeit aufgestellten agentenbasierten Bauablaufmodell auch zur Risikoanalyse eingesetzt werden. Möglich wird dies durch das detaillierte Leistungs-Ermüdungsmodell, das die Ermüdung und das Leistungsangebot der Arbeitskräfte basierend auf den Erkenntnissen der Ergonomie abbildet. Im Fokus steht das Bauzeitrisiko infolge Witterungseinflüssen, wobei die Forschungsergebnisse von Fetzner und statistische Wetterdaten als Datenbasis dienen.

Nachfolgend sind die Ergebnisse der Simulationsergebnisse für unterschiedliche statistische Temperaturwerte und Ressourcen in Tabelle 21 zusammengefasst. Die berechneten Abweichungen der Dauer beziehen sich jeweils auf die Gesamtdauer für den entsprechenden Ressourceneinsatz beim Mittelwert der Temperatur. Hier wird deutlich, dass die Abweichungen für April, also bei den statistischen Temperaturschwankungen innerhalb eines Monats, deutlich geringer sind als für ein ganzes Jahr. Außerdem ist eine gewisse Schwankung der Simulationsergebnisse erkennbar, die sich aus wahrscheinlichkeitsgesteuerten Entscheidungen der Agenten ergeben. Dennoch ist eindeutig ablesbar, dass bei Temperaturen zwischen 10°C und 20°C die optimalen Arbeitsbedingungen herrschen.

			Facharbeiter 2		Facharbeiter 2 + Hilfsarbeiter 2		Facharbeiter 5		Facharbeiter 5 + Hilfsarbeiter 7	
			Dauer	Abweichung	Dauer	Abweichung	Dauer	Abweichung	Dauer	Abweichung
April	5%-Quantil	7,6 °C	3914	2,2%	3401	4,0%	3329	1,7%	2788	-0,1%
	20%-Quantil	10,3 °C	3843	0,4%	3304	1,1%	3240	-1,0%	2789	-0,1%
	Mittelwert	13,7 °C	3829	0,0%	3269	0,0%	3274	0,0%	2792	0,0%
	80%-Quantil	17,2 °C	3770	-1,5%	3256	-0,4%	3209	-2,0%	2770	-0,8%
	95%-Quantil	20,8 °C	3764	-1,7%	3037	-7,1%	3202	-2,2%	2781	-0,4%
Jahr	5%-Quantil	1,4 °C	4239	11%	3538	7%	3537	7,6%	2774	3,7%
	20%-Quantil	6,6 °C	3999	5%	3324	0%	3366	2,4%	2792	4,3%
	Mittelwert	13,5 °C	3812	0%	3311	0%	3286	0,0%	2676	0,0%
	80%-Quantil	20,6 °C	3803	0%	3320	0%	3208	-2,4%	2751	2,8%
	95%-Quantil	25,4 °C	3877	2%	3414	3%	3271	-0,5%	2745	2,6%

Tabelle 22: Auswertung der Simulationsergebnisse für die Risikoanalyse bezüglich der Witterungseinflüsse

Trotz der Schwankungen bei den Simulationsergebnissen zeigt sich, dass, bezogen auf das gesamte Jahr, insbesondere niedrige Temperaturen zur Verlängerung der Bauzeit führen. Hierzu ist in Abbildung 88 die Abweichung der Gesamtdauer bei unterschiedlichen Temperaturwerten und unterschiedlichem Ressourceneinsatz dargestellt. Für das 5%-Quantil der Temperatur, also den Wert, der an 5% der Tage eines Jahres unterschritten wird, ergibt sich im Vergleich zum Mittelwert der Temperatur je nach Ressourceneinsatz eine Verlängerung der Bauzeit um 3,5% bis 11%.

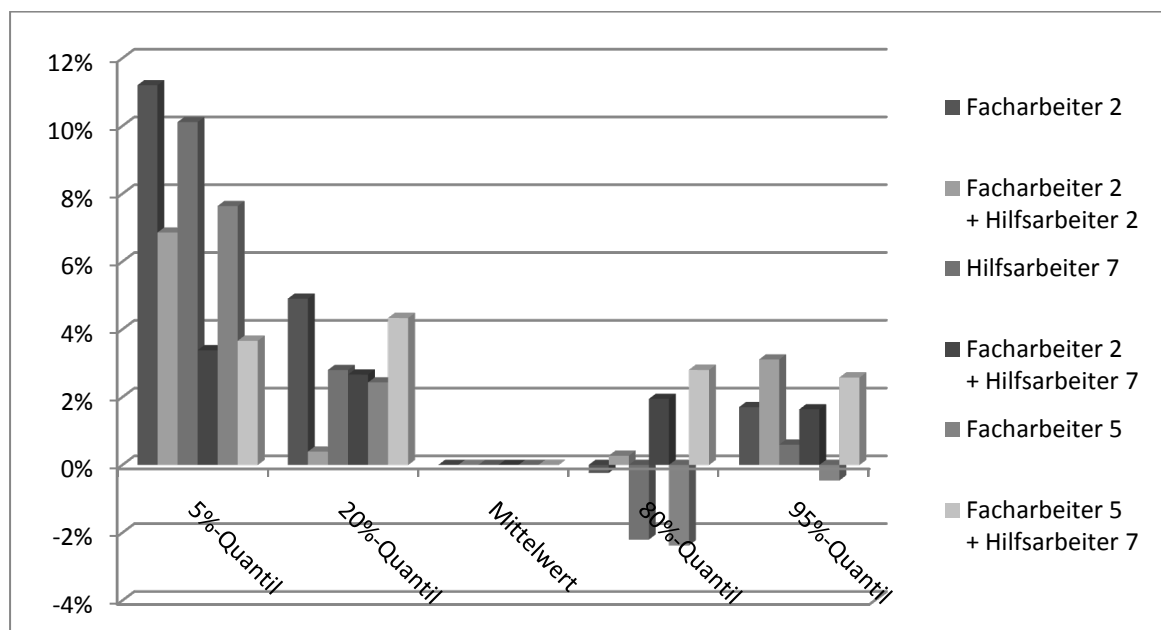


Abbildung 88: Abweichungen der Gesamtdauer bei den Jahres-Temperaturquantilen von der Gesamtdauer beim Mittelwert

Damit kommt man im Rahmen der Risikoanalyse der Temperatureinflüsse auf die Bauzeit zu folgendem Fazit: Finden die Montagearbeiten mit Sicherheit im April statt, so beträgt die maximal zu erwartende Verlängerung der Bauzeit infolge Temperatur weniger als drei Stunden und kann daher vernachlässigt werden. Wenn die Montage dagegen irgendwann im Verlauf des Jahres stattfinden wird, so ist mit einer Verlängerung der Bauzeit um bis zu einen Tag respektive 11% zu rechnen. Das entsprechende Bauzeitrisiko sollte daher durch Einplanung von Pufferzeiten, einen Risikozuschlag bei der Kalkulation bzw. entsprechende vertragliche Regelungen berücksichtigt werden.

6.4.4 Festlegung von Plan-Werten und Bereitstellung der Simulationsergebnisse in einer Ontologie

Nach Abschluss der Analysen sind durch den Arbeitsvorbereiter basierend auf den Simulationsergebnissen die Plan-Werte für die Termine und Ressourcen des Bauprojekts festzulegen. Geht man davon aus, dass die Bauzeit und damit auch die Vorhaltdauer des Teleskopstaplers minimiert werden soll, so wird sich der Arbeitsvorbereiter für den Einsatz zweier Monteure, die den Stereotypen „F5“ und „H7“ entsprechen, entscheiden. Geht man weiterhin davon aus, dass die Baumaßnahme im April durchgeführt werden soll, so kann man die Mittelwerte der Temperatur für April als Eingangsgröße für das Plan-Szenario verwenden.

Als Gesamtdauer liegt als Simulationsergebnis der Wert von 2792 Minuten respektive 46,5 Stunden vor. Bei einer täglichen Arbeitszeit von acht bis zehn Stunden und fünf Arbeitstagen ergibt sich damit eine Montagedauer von einer Woche.

Die Umwandlung dieser Simulationsergebnisse, die im CSV-Format vorliegen, in die ABox einer Ontologie ist möglich, da man die CSV-Datei mit Excel in eine XML-Datei mit fester Struktur umwandeln kann. Die XML-Datei kann dann per XSLT in eine OWL-Ontologie mit XML-Syntax transformiert werden. Der Screenshot in Abbildung 89 zeigt die beiden CSV-Ausgabedateien vor der Ontologie-ABox im XML-Editor oXygen.

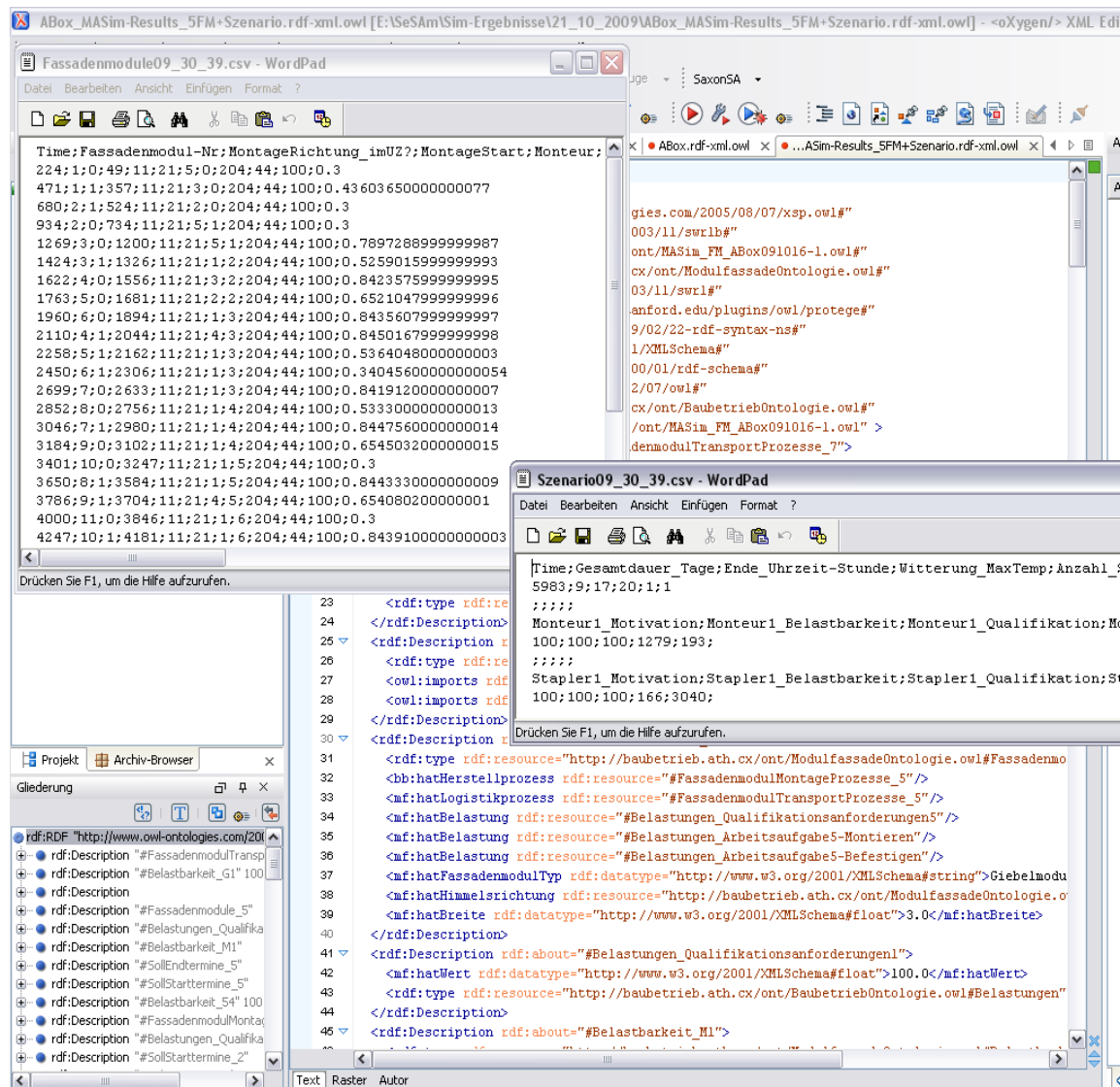


Abbildung 89: CSV-Quelldateien von SeSAM und OWL-ABox im XML-Format

6.5 Stufe 2: Anwendung der Multiagentensimulation für die Kontrolle und Steuerung einer Fassadenmontage

Die Anwendung der Multiagentensimulation für die Kontrolle und Steuerung wird an dem in Kapitel 6.4 vorgestellten fiktiven Projekt zur Fassadenmodernisierung fortgesetzt. Während die zugrundeliegenden Plan-Daten auf den Monat April zugeschnitten waren, wird davon ausgegangen, dass die tatsächliche Ausführung während des Hochsommers stattfindet, wobei beispielhaft die Wetterdaten von

Anfang August 2003 verwendet werden. Zugleich werden entgegen der Planung die Monteur-Stereotypen „F2“ und „H2“ für die Montagearbeiten eingesetzt.

Im ersten Abschnitt wird gezeigt, wie Experimente der Multiagentensimulation Soll- und Prognose-Daten erzeugen können und welche Eingangsdaten hierfür benötigt werden. Außerdem werden Optionen zur Beschleunigung des Baufortschritts simuliert, um Daten für eine Maßnahmenauswahl bereitzustellen. Im zweiten Abschnitt werden dann an verschiedenen Stichtagen Plan-Soll-Ist-Prognose-Vergleiche zum Baufortschritt durchgeführt sowie Optionen für Beschleunigungsmaßnahmen verglichen. Dabei wird auch die Aussagekraft der Gegenüberstellung unterschiedlicher Daten zum Baufortschritt deutlich.

6.5.1 Erzeugung von Soll- und Prognose-Daten zum Fortschritt der Fassadenmontage

Zunächst werden die Eingangsdaten für die Soll-, Prognose- und Options-Baufortschritte in Situationen als Ausgangspunkt für die Simulationsexperimente aufbereitet. Bei den mittleren Temperaturen handelt es sich für die Plan-Situation um die Festlegung respektive Abschätzung der Temperatur während der Arbeitsvorbereitung, während dem Soll-Wert der tatsächliche Messwert zugrunde liegt und die Prognose sowie die Option auf aktuellen Vorhersagen beruhen. Die Monteure geben den aktuellen Stand der Ressourcenplanung bzw. den tatsächlichen Ressourceneinsatz wieder. Während sich das Simulationsexperiment des Plan-Baufortschritts im Rahmen der Arbeitsvorbereitung auf die Gesamtmontage bezieht, endet das Experiment für den Soll-Baufortschritt zum aktuellen Zeitpunkt, von dem aus dann der Prognose- und auch der Options-Baufortschritt startet.

	Plan	Soll	Prognose	Option D
Mittlere Temperatur	13,5 °C	29,8 °C	29 °C	29 °C
Monteure	F5 + H7	F2 + H2	F2 + H2	F2 + F4
Experiment-Beginn	1. AT	1. AT	2. AT	2. AT
Experiment-Ende	5. AT	2. AT	6. AT	5. AT

Tabelle 23: Eingangswerte der Szenarien für die Simulationsexperimente zum Zeitpunkt "Ende des ersten Arbeitstags"

Die Ergebnisse der Simulationsexperimente mit den Eingangswerten aus Tabelle 23 sind in Abbildung 90 in einem Diagramm dargestellt. Eine baubetriebliche Analyse der Kurven erfolgt in Abschnitt 6.6.2. Hier sei zunächst auf die Streuung der

einzelnen Montagedauern hingewiesen, die durch die Überlagerung unterschiedlicher ergonomischer Belastungen und Eigenschaften der Arbeitskräfte entstehen.

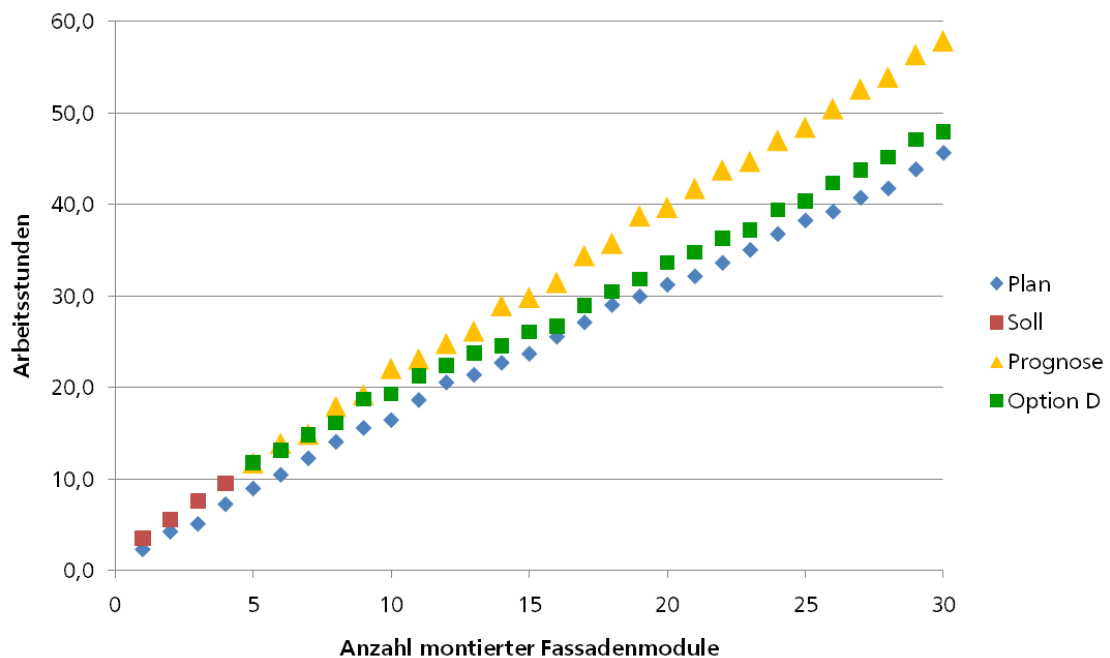


Abbildung 90: Stundenweise Darstellung unterschiedlicher Baufortschritte am ersten Arbeitstag

Die oben gewählte Form, bei der auf der y-Achse die geleisteten Arbeitsstunden aufgetragen sind, hat dabei die Einschränkung, dass der Einfluss von Überstunden auf den Baufortschritt bezogen auf die Tage nicht abbildbar ist. Daher wurde in dem Diagramm in Abbildung 91 zum Vergleich unterschiedlicher Beschleunigungsoptionen eine Unterteilung der y-Achse in Arbeitstagen gewählt.

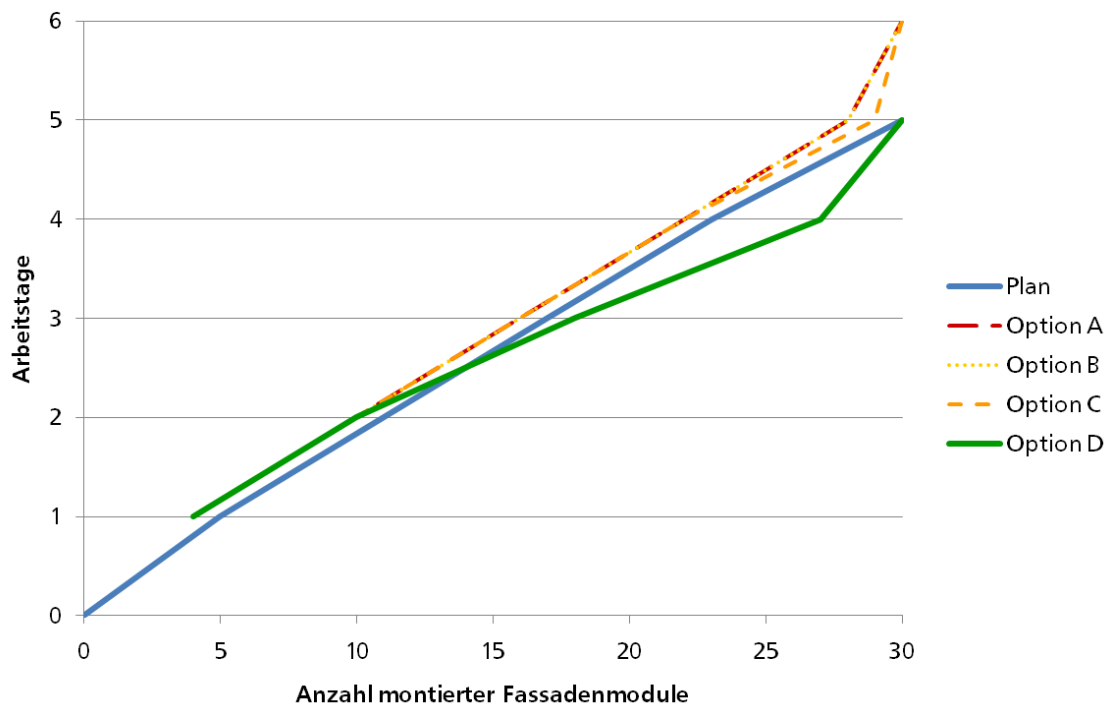


Abbildung 91: Tageweise Darstellung nach Plan und für Beschleunigungsoptionen

6.5.2 Plan-Soll-Ist-Prognose-Vergleiche und Maßnahmenauswahl

Im Folgenden werden die Plan-, Soll-, Ist- und Prognose-Werte zum Baufortschritt verglichen und analysiert. In diesem Beispiel wird davon ausgegangen, dass die tägliche Durchführung des Plan-Soll-Ist-Prognose-Vergleichs genügt, um zeitnah über Steuerungsmaßnahmen entscheiden zu können. Zunächst werden die Plan-, Soll- und Ist-Baufortschritte zum Stichtag in Form eines Säulendiagramms gegenübergestellt, um Unterschiede zwischen den Plan- und Soll-Werten sowie den Soll- und Ist-Werten erkennen zu können. Daraufhin wird der Plan-Baufortschritt dem Prognose-Baufortschritt in einem Liniendiagramm gegenübergestellt, so dass ablesbar wird, ob der geplante Endtermin unter den gegebenen Randbedingungen eingehalten werden kann.

In Abbildung 92 sind die beiden Diagramme für den Plan-Soll-Ist-Prognose-Vergleich zum Ende des ersten Arbeitstages dargestellt. Man erkennt, dass der Soll- und Prognose-Baufortschritt aufgrund der extremen Hitze und der weniger leistungsfähigen Monteure geringer ist als der Plan-Baufortschritt. Der Ist-Baufortschritt ist mit dem Soll-Baufortschritt identisch, das heißt, die realen Montagetagearbeiten verhalten sich entsprechend dem ergonomiebasierten Multiagentenmodell der Modulmontage.

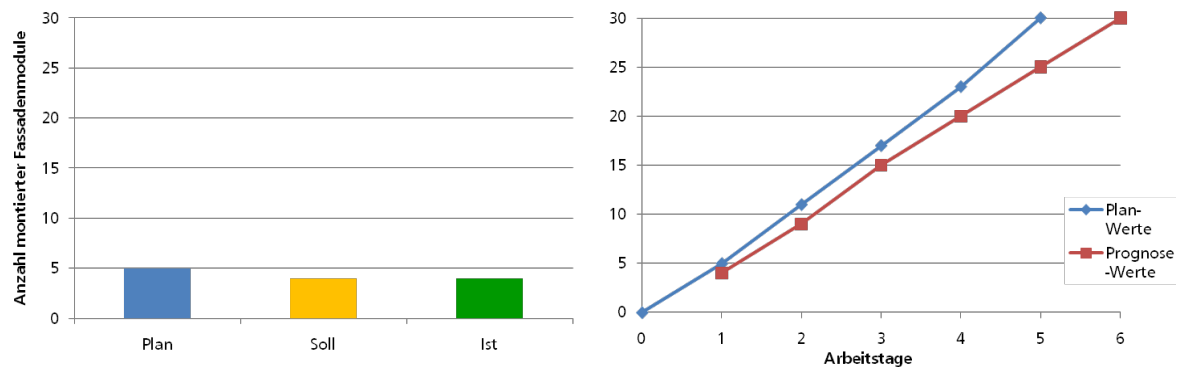


Abbildung 92: Plan-Soll-Ist-Vergleich und Plan-Prognose-Vergleich am Ende des ersten Arbeitstages

Aufgrund der im Vergleich der Plan- und Prognose-Werte ablesbaren Verlängerung der Bauzeit um einen Arbeitstag werden unterschiedliche Optionen zur Beschleunigung des Baufortschritts untersucht. Zunächst werden die drei Optionen A, B und C, die in Tabelle 24 zusammengefasst sind, in Simulationsexperimenten nachgestellt. Die Ergebnisse besagen, dass weder die Anordnung von zwei Überstunden noch der Einsatz eines zweiten Staplers bzw. eines leistungsfähigeren Monteurs ausreichen, um die Montagearbeiten am Ende des fünften Arbeitstages abzuschließen. Allerdings verbleiben jeweils nur ein bis zwei Fassadenmodulmontagen für den sechsten Arbeitstag. Daher wird die zusätzliche Option D aufgestellt, bei der der leistungsschwächere Monteur ausgetauscht sowie eine Überstunde pro Tag angeordnet wird. Da das Simulationsexperiment hier die Fertigstellung am fünften Arbeitstag ergibt, wird Option D umgesetzt, da sie die Einhaltung des Plan-Endtermins ohne Steigerung der Arbeitskräftezahl ermöglicht.

	Option A	Option B	Option C	Option D
Überstunden	2	0	0	1
Stapler-Anzahl	1	2	1	1
Monteure	F2 + H2	F2 + H2	F2 + F4	F2 + F4
EndTermin	6. AT	6. AT	6. AT	5. AT

Tabelle 24: Eingangswerte und Ergebnisse der Simulationsexperimente zur Überprüfung von Optionen zur Beschleunigung des Baufortschritts

In Abbildung 93 sind die Daten für den Plan-Soll-Ist-Prognose-Vergleich nach Umsetzung der Beschleunigungsoption D am Ende des zweiten Arbeitstages dargestellt. Der Plan-Baufortschritt liegt zwar noch um die Montage eines Fassadenmoduls über dem Soll-Wert, doch dies lässt sich mit der Einarbeitungsphase des leistungsfähigeren Monteurs erklären. Wie man im Plan-Prognose-Vergleich erkennt,

liegt die tägliche Montageleistung an den folgenden Tagen über dem Plan-Wert, so dass der geplante Endtermin eingehalten werden kann.

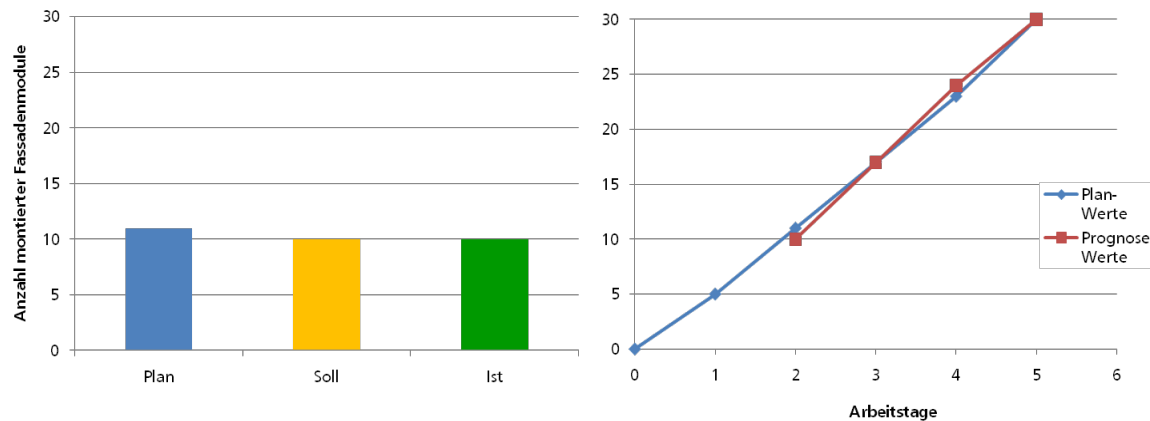


Abbildung 93: Plan-Soll-Ist-Vergleich und Plan-Prognose-Vergleich am Ende des 2. AT

Auch der Vergleich der Werte zum Baufortschritt am vierten Arbeitstag bestätigt die Prognosen aus dem Vergleich am zweiten Arbeitstag. In dem Beispiel sind also keine Änderungen oder nicht berücksichtigten Ereignisse mit Auswirkungen auf den Baufortschritt aufgetreten, denn diese wären ansonsten im Soll- bzw. Ist-Baufortschritt erkennbar.

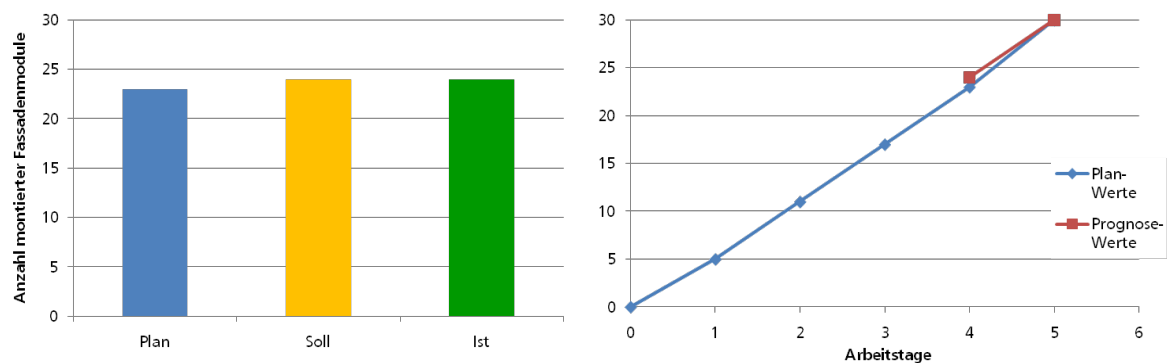


Abbildung 94: Plan-Soll-Ist-Vergleich und Plan-Prognose-Vergleich am Ende des vierten Arbeitstages

6.5.3 Ontologiebasierter Informationsaustausch

Um den Austausch von Informationen auf Basis einer Ontologie zu ermöglichen, müssen die Daten aus den relevanten Simulationsexperimenten in die ABox einer Ontologie gespeichert werden. Da SeSAM seine Daten im CSV-Format speichert, sind zwei Transformationsschritte zur Erzeugung einer ABox im OWL-Format er-

forderlich. Zunächst wird die CSV-Datei in MS Excel geöffnet und im XML-Format gespeichert, um danach eine XSLT-Transformation der XML-Datei in eine OWL-Datei mit XML-Syntax zu ermöglichen.

Aus der Ontologie-ABox können dann mit Hilfe der Anfragesprachen SPARQL oder SQWRL gezielt Daten zum Bauablauf abgerufen werden. Beispielhaft ist in Abbildung 95 die Abfrage der Montageprozesse und Termine einzelner Fassadenmodule aus einer ABox mit SQWRL dargestellt. Über die reine Abfrage zusammenhängender Informationen hinaus sind Funktionen wie Filterung oder Sortierung möglich, um die Informationen in der gewünschten Struktur zu erhalten.

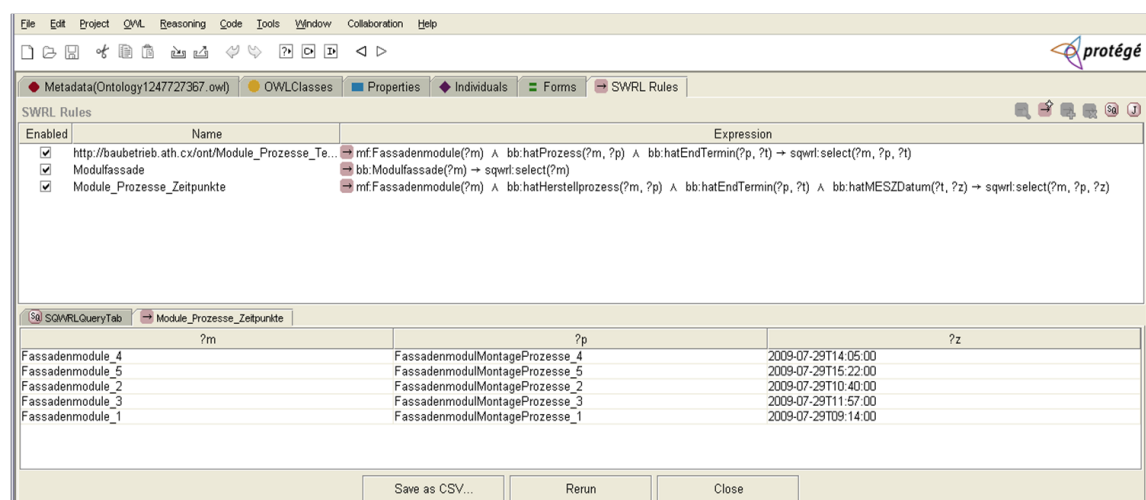


Abbildung 95: Screenshot eine SQWRL-Abfrage in Protégé

6.6 Bewertung des Vorgehens im Anwendungsbeispiel

Abschließend soll das Vorgehen im Rahmen des Anwendungsbeispiels reflektiert werden, um die Vollständigkeit, Richtigkeit und Praktikabilität des in den Kapiteln 4 und 5 aufgestellten Vorgehensmodells zu beurteilen. Hierzu werden die praktisch durchgeführten und notwendigen Schritte zur Aufstellung, Prüfung und Nutzung des Bauablaufmodells für die Multiagentensimulation mit dem Vorgehensmodell verglichen und die Umsetzbarkeit des Vorgehensmodells überprüft. Wichtig ist dabei insbesondere die Plausibilität des Vorgehensmodells und der gleichzeitige Versuch, es zu falsifizieren.

Die Beurteilung des Vorgehensmodells gliedert sich dabei in vier Abschnitte. Zunächst wird ein Fazit bezüglich der ersten beiden Schritte des Vorgehensmodells, die die arbeitswissenschaftliche und agentenbasierte Modellierung umfassen, gezogen. Daraufhin folgt die Überprüfung des dritten Schritts mit der Validierung,

Verifikation und Justierung des Multiagentenmodells. Die aus nochmals drei Schritten bestehende Nutzung des Multiagentenmodells wird schließlich hinsichtlich der Nutzungsmöglichkeiten im Rahmen der Arbeitsvorbereitung und des Termin- und Ressourcencontrollings bewertet. Hierbei werden auch die Anwendbarkeit in der Baupraxis mit ihren Vor- und Nachteilen sowie neue Möglichkeiten im Vergleich mit herkömmlichen Techniken betrachtet.

6.6.1 Fazit zum Vorgehensmodell der Montageprozessmodellierung

Das Vorgehensmodell zu Aufstellung eines agentenbasierten Modells der Montageprozesse eines Fassadensystems wurde, wie oben beschrieben, angewendet. Tabelle 25 listet die modellierten Aspekte des realen Montagesystems auf und verweist auf die Abschnitte des Vorgehensmodells, die jeweils zur Anwendung kamen.

Aspekt	Abstraktes Modell		Spezifikation	Implementierung	Kapitelverweis
	Arb.wiss.	Agenten			
Entitäten	Arbeitssystem-Elemente	Agenten, Ressourcen	Klassen	Entitäten erzeugen	Kapitel 4.2
Verhalten	Arbeitsablauf	Aktivitätsgraph der Agenten	UML	Aktionen inkl. Bewegung	Kapitel 4.2 & 4.4.1
Kooperation	Abhängigkeiten	indirekte Kommunikation	Boolesche Variablen	Manipulation/Wahrnehmung	Kapitel 4.2 & 4.4.2
Kommunikation	--	direkte Kommunikation, FIPA	FIPA/UML	Kommunikations-Aktionen	Kapitel 4.2 & 4.4.2
Ergonomie	Ergonom. Modell	--	Algorithmen, Variablen	Funktionsdefinition	Kapitel 4.2, 4.3 & 4.4.4
Anlieferung	Arbeitssystem-Eingaben	--	Erzeugung	Verhalten der Umwelt	Kapitel 4.2 & 4.4.3
Montagefortschritt	Arbeitssystem-Ausgaben	--	Dokumentation der Montagen	Ausgabedatei mit Terminen	Kapitel 4.6.3

Tabelle 25: Umsetzung der Modellierungsaspekte bei der Fassadenmodulmontage

Die Elemente des Arbeitssystems nach REFA lassen sich entsprechend dem Vorgehensmodell direkt in das agentenbasierte Modell des Montageablaufs überführen. Der Arbeitsablauf wird gemäß dem Vorgehensmodell modelliert, wobei die vorgegebenen UML-Diagramme adaptiert werden können. Für beide Aspekte findet also lediglich eine Konkretisierung der Vorgaben für das konkrete Beispiel statt.

Für die Kooperation beim Transport und der Montage eines Fassadenmoduls wird dem Vorgehensmodell folgend die indirekte Kommunikation über Variablen des Bauelements verwendet. Die direkte Kommunikation zur Vereinbarung der Zusammenarbeit für die Montage eines Fassadenmoduls erfolgt wie im Vorgehensmodell beschrieben.

Die Ergonomie wird größtenteils durch das ergonomische Leistungs-Ermüdungsmodell aus Kapitel 4.3 wiedergegeben, so dass die agentenbasierte Abbildung und Implementierung weitgehend dem Vorgehensmodell folgt. Nur die Festlegung von Standardwerten für die Eigenschaften und Belastungen ist als logische Fortschreibung des Vorgehensmodells anzusehen.

Bei der Modellierung der Anlieferung entspricht dies der Idee des Vorgehensmodells. Um die Montagereihenfolge der Fassadenmodule an der Außenwand abbilden zu können, ist es allerdings notwendig, die Bauelemente für zwei Richtungen parallel zu erzeugen, d.h. es gibt zwei Listen mit den Bauelementeigenschaften, und es gibt jeweils eine Anlieferung mit Modulen, die von einer Gebäudeecke aus im Uhrzeigersinn montiert werden, sowie eine mit Modulen gegen den Uhrzeigersinn. Ein entsprechender Algorithmus ist zwar mit dem Vorgehensmodell kompatibel, stellt aber eine für diesen Fall notwendige Erweiterung der Vorgehensweise dar. Er wurde nicht in das Vorgehensmodell integriert, da die Montagerichtung bei anderen Fertigteilen anderen Gesetzmäßigkeiten folgt.

Die Dokumentation des Montagefortschritts erfolgt über die Ausgabe jeder Fassadenmodulmontage in eine spezifische Ausgabedatei im CSV-Format. Hierbei wird für jedes Fassadenmodul der Beginn und das Ende der Montage in Arbeitsminuten sowie als Uhrzeit an einem Arbeitstag dokumentiert.

Die Tatsache, dass die hier betrachteten Aspekte der Montage mit Hilfe des Vorgehensmodells modelliert werden konnte, belegt dessen Plausibilität und Praxis-tauglichkeit. Von daher ist auch die Falsifikation misslungen und es konnte gezeigt werden, inwiefern das Vorgehensmodell einer wissenschaftlichen Überprüfung zugänglich ist.

6.6.2 Bilanz zur Anwendung der Verifikation, Validierung und Justierung des Multiagentenmodells

Die Überprüfung und Justierung des agentenbasierten Modells der Fassadenmodulmontage erfolgte anhand des in Kapitel 4.5 beschriebenen Vorgehens. Die Modellierungsschritte bzw. Simulationsergebnisse wurden mit den Techniken und anhand der Vorgaben überprüft, um die Transformationsschritte des Modells zu verifizieren, das Modellverhalten zu validieren und insbesondere die Umsetzung des ergonomischen Leistungs-Ermüdungsmodells und seiner Parameter zu justieren. Die jeweiligen Phasen, Aufgaben sowie die eingesetzten Techniken und Methoden sind in Tabelle 26 mit einem Verweis auf das Vorgehensmodell zusammengefasst.

Phase	Aufgabe	Techniken und Methoden	Kapitelverweis
Aufstellen des Modells	Verifikation der Modelltransformation	Analyse der Experimentanimation und des Parameterverlaufs	Kapitel 4.5.1
Verhalten des Modells	Validierung des Gesamtverhaltens	Vergleich Simulationsergebnis und Handrechnung	Kapitel 4.5.2
Nullbeanspruchung	Justierung der Grunddauern	Graphische und rechnerische Analyse der Simulationsergebnisse	Kapitel 4.5.3.1
Standardbeanspruchung	Justierung der Ergonomieparameter	Parameterstudie zur Annäherung der Simulationsergebnisse	Kapitel 4.5.3.2
Extrembeanspruchung	Validierung der Extrembereiche	Analyse und Bewertung der Gesamtdauer und deren Aufteilung	Kapitel 4.5.3.3
Zusatz-tätigkeiten	Validierung der Zusatztätigkeiten	Dauernanalyse bei unterschiedlicher Ressourcenanzahl	Kapitel 4.5.3.4

Tabelle 26: Umsetzung der Qualitätssicherung beim Modell der Fassadenmontage

Die Verifikation anhand der Animation des Verhaltens der Agenten bei der Montage sowie die Analyse des Verlaufs ausgewählter Parameter war entsprechend dem Vorgehensmodell möglich und offenbarte Implementierungsfehler frühzeitig. Auch die Validierung des Gesamtmodells basierend auf dem Einfluss einzelner Einflussgrößen auf die Gesamtdauer war gemäß dem Vorgehensmodell erfolgreich. Somit wurde sichergestellt, dass man das richtige Modell aufgestellt und es auch richtig umgesetzt hat.

Die Bestimmung und Justierung der Tätigkeitsdauern bei Nullbeanspruchung erfolgte durch einen Vergleich der rechnerischen Werte basierend auf Aufwandswerten und der Bestimmung der Bestandteile der Gesamtdauer des Simulationsexperiments. Hierzu wurden die im Modell zur Aufstellung einer agentenbasierten Montagesimulation erläuterten Formeln verwendet.

Zur Justierung des ergonomischen Modells bei Standardbeanspruchungen wurde eine Parameterstudie durchgeführt, um, dem Vorgehensmodell folgend, die Einflussfaktoren auf das ergonomische Leistungsangebot so einzustellen, dass die Simulationsergebnisse mit den theoretischen Erkenntnissen übereinstimmen. Die Validierung des Multiagentenmodells für Extrembeanspruchungen erfolgte darauf aufbauend durch eine Analyse der Veränderung und Aufteilung der Gesamtdauer bei extrem hohen und niedrigen Beanspruchungen bzw. Eigenschaften der Agenten.

Bei Validierung der Zusatztätigkeiten zeigt sich in der quantitativen Analyse der Aufteilung von Grund- und Erholzeiten, Zusatztätigkeiten und Wartezeiten die konkrete Ausprägung der im Vorgehensmodell beschriebenen Auslastungsgrade hinsichtlich der Auswirkung von Zusatztätigkeiten unterschiedlicher Agenten auf die Gesamtdauer.

Zusammenfassend ergibt sich mit der Umsetzung der Qualitätssicherung entsprechend dem Vorgehensmodell über alle Phasen eine wirksame Verifikation und Validierung sowie Justierung des agentenbasierten Modells der Fassadenmodulmontage. Das empfohlene Vorgehen stieß weder an seine Grenzen, noch wurde es durch entgegengesetzte Ergebnisse falsifiziert.

6.6.3 Bewertung des Einsatzes der Multiagentensimulation für die Arbeitsvorbereitung

Der Einsatz der Multiagentensimulation für die Termin- und Ressourcenplanung im Rahmen der Arbeitsvorbereitung folgt dem Schema zur agentenbasierten Bauablaufsimulation aus Kapitel 5.2. Wie in Tabelle 27 dargestellt ist, wurden die Schritte zur Aufstellung der Szenarien und Auswertung der Simulationsergebnisse detailliert betrachtet, während die Durchführung der Experimente weitgehend automatisiert ablaufen.

Schritt/Aspekt		Methode/Hilfsmittel	Kapitelverweis
Szenario	<i>Projekt</i>	Fixe Vorgabe	Kapitel 5.2.1
	<i>Umwelt</i>	Statistische Temperaturwerte je Monat und deren Modellierung	Kapitel 5.2.1
	<i>Agenten</i>	Stereotypen für Bauarbeitskräfte	Kapitel 5.2.1
Experiment		Mehrfache Experimente in SeSAM und deren Dokumentation in Ausgabedateien	Kapitel 5.2.2
Auswertung	<i>Daten-Aufbereitung</i>	Berechnung von Kennwerten aus den Daten in den Ausgabedateien	Kapitel 5.2.2
	<i>Optimierung</i>	Optimierung hinsichtlich Bauzeit oder Ressourceneinsatz	Kapitel 5.2.2
	<i>Risikoanalyse</i>	Streuung der Bauzeit aufgrund geänderter Randbedingungen (insb. Temperatur)	Kapitel 5.2.2
	<i>Plan-Festlegung</i>	Entscheidung für ein Plan-Szenario → Plan-Ressourcen und Dauern	Kapitel 5.2.2

Tabelle 27: Umsetzung des Vorgehensmodells zur Nutzung der Multiagentensimulation in der Arbeitsvorbereitung

Beim Aufstellen der Szenarien wurde zunächst die Geometrie des Gebäudes und der Baustelle als fixe Eingangsgrößen für die Situation in SeSAM festgelegt. Als durchschnittliche, günstige und ungünstige Szenarien der Umweltbedingungen wurden danach, dem Vorgehensmodell folgend, der Mittelwert sowie vier Temperaturquantile des für die Bauausführung vorgesehenen Monats April definiert. Als letzte Stufe bei der Aufstellung des Szenarios folgte die Auswahl möglicher Ressourcen in Form von Geräten sowie Anzahl und Stereotyp der Monteure. Alle Stufen zur Erstellung der Szenarien folgen dem Vorgehen aus Abschnitt 5.2.1 und konnten die dort zur Verfügung gestellten Tabellenwerte sinnvoll nutzen.

Die Durchführung eines Experiments erfolgt in SeSAM automatisiert und generiert Datendateien zum Ablauf des Experiments. Aufgrund zufälliger Entscheidungen im Simulationsablauf kommt es bei den Simulationsergebnissen zu Schwankungen, weshalb, wie in Abschnitt 5.2.2 beschrieben, für jedes Szenario mehrere Simulationsexperimente notwendig sind. Daher wäre eine weitergehende Automatisierung wünschenswert, bei der für alle Szenarien mehrere Simulationsexperimente selbsttätig ablaufen und der Auswertung zugeführt werden.

Die Auswertung der Ergebnisse folgte der Vorgehensweise aus Abschnitt 5.2.2 und generiert zunächst die dort beschriebenen allgemeinen Kennwerte. Beim Vergleich unterschiedlicher Szenarien ließ sich der Ressourceneinsatz optimieren oder das Terminrisiko infolge von Witterungseinflüssen quantifizieren. Die im Vorgehensmodell beschriebenen Abläufe und Kennwerte sind für die Termin- und Ressourcenplanung während der Arbeitsvorbereitung gut geeignet. Damit erschließt das Vorgehensmodell den Vorteil der Simulation, nämlich die Möglichkeit, mit einem Modell des Bauablaufs zu experimentieren, indem unterschiedliche Szenarien wirksam verglichen werden.

6.6.4 Fazit zur Nutzung der Simulation als Werkzeug der Kontrolle und Steuerung des Baufortschritts

Analog zur Anwendung der Multiagentensimulation in der Arbeitsvorbereitung, sind beim Controlling Situationen aufzustellen, Experimente durchzuführen und deren Ergebnisse auszuwerten. Dies ist, wie oben dargestellt, mit dem vorliegenden Vorgehensmodell effizient möglich. Im Gegensatz zur Arbeitsvorbereitung sind bei der Kontrolle und Steuerung Baufortschritte, die auf unterschiedlichen Eingangs-Daten beruhen, miteinander zu vergleichen, um Abweichungen zu erkennen und den Bauablauf wirksam steuern zu können.

In Tabelle 28 werden zunächst die im Rahmen der Kontrolle und Steuerung zu unterscheidenden Baufortschritte mit ihren Eingangs-Daten und Ergebnissen dargestellt. Über alle Experimente hinweg wurden die entsprechenden Eingangsdaten fiktiv angenommen und deren Generierung erfolgreich durchgespielt. Sowohl die Generierung als auch die Auswertung der Simulationsergebnisse waren, wie in den zugehörigen Kapiteln beschrieben, möglich und lieferten plausible Daten.

Experimente/Daten		Kennwerte, Verwendung	Kapitelverweis
Soll	<i>Eingangs-Daten</i>	Ist-Daten aus Berichterstattung und Sensorik der Baustelle	Kapitel 5.3.1.2
	<i>Ergebnisse</i>	Gegenüberstellung des Soll-Baufortschritts mit Plan- und Ist-Werten	Kapitel 5.3.1.2
Prognose	<i>Eingangs-Daten</i>	Aktuelle Prognosen der Randbedingungen sowie derzeitiger Baufortschritt	Kapitel 5.3.2.1
	<i>Ergebnisse</i>	Gegenüberstellung des Prognose- und Plan-Baufortschritts sowie des Endtermins	Kapitel 5.3.2.1

Option	<i>Eingangs-Daten</i>	Prognose-Eingangs-Daten plus Änderungen zur Anpassung der Leistung	Kapitel 5.3.2.2
	<i>Ergebnisse</i>	Vergleich unterschiedlicher Leistungsanpassungen hinsichtlich ihrer Wirkung	Kapitel 5.3.2.2

Tabelle 28: Ein- und Ausgabedaten unterschiedlicher Simulationsexperimente im Rahmen des Controllings entsprechend dem Vorgehensmodell

Für die durchzuführenden Vergleiche von Baufortschritten basierend auf unterschiedlichen Eingangsdaten sind in Tabelle 29 die jeweilige Aussagekraft und das Kapitel mit der Beschreibung des Vorgehens aufgeführt. Deren Durchführung ist wie beschrieben möglich und lieferte im Anwendungsbeispiel auch die zu erwartenden Aussagen. Damit ist es möglich, die Multiagentensimulation zur Erweiterung der bestehenden Möglichkeiten zum Controlling von Terminen, Baufortschritt und Ressourceneinsatz zu nutzen. Von Nutzen für die Baupraxis können sowohl die detaillierte Ursachenanalyse und Bauzeitprognose als auch der simulationsgestützte Vergleich von Beschleunigungsmaßnahmen sein.

Vergleich	Aussagekraft	Kapitelverweis
Plan-Soll-Vergleich	Abweichungen infolge geänderter Randbedingungen (Eingangsdaten d. Situationen)	Kapitel 5.3.3
Soll-Ist-Vergleich	Abweichungen, die sich nicht aus erfassten Randbedingungen und dem Modell ergeben	Kapitel 5.3.3
Plan-Prognose-Vergleich	Prognose zukünftiger Abweichungen von den Planwerten zum Baufortschritt	Kapitel 5.3.3
Optionen-Vergleich	Gegenüberstellung von Möglichkeiten zur Beeinflussung des Baufortschritts	Kapitel 5.3.3

Tabelle 29: Baufortschritts-Vergleiche nach dem Vorgehensmodell

Kapitel 7

Fazit

7.1 Bewertende Zusammenfassung

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurde ein Vorgehen entwickelt, das die individuenbasierte Simulation des Bauablaufs für baubetriebliche Zwecke nutzbar macht und die individuelle Leistung von Arbeitskräften abbildet, um den Einsatz der Simulationstechnik für die Planung, Kontrolle und Steuerung von Bauprozessen effizienter und effektiver zu gestalten.

In Kapitel 1 werden die Motivation und die Praxisprobleme hinsichtlich der Integration ergonomischer Erkenntnisse und neuer Technologien aus der Informatik für die Simulation im Baubetrieb dargestellt. Dabei wird deutlich, dass für die Anwendung der ergonomiegestützten Multiagentensimulation in der Arbeitsvorbereitung und Bauprozesssteuerung ein zweistufiges baubetriebliches Vorgehensmodell benötigt wird. Die wissenschaftliche Vorgehensweise hierzu sieht die Entwicklung des Vorgehensmodells auf Basis theoretischer Grundlagen und praktischer Probleme vor. Abschließend wird das Vorgehensmodell anhand eines Anwendungsbeispiels überprüft und bewertet.

Als baubetriebliche Grundlagen werden die Montageprozesse auf Baustellen und deren Controlling dargelegt. Dabei wird als Basis für das Controlling von Bauprozessen die Planung der Termine und Ressourcen während der Arbeitsvorbereitung sowie die Kontrolle und Steuerung von Bauprozessen beschrieben. Es wird deutlich, dass eine zeitnahe Bauprozesssteuerung notwendig ist, um eine erfolgreiche Bauausführung im Rahmen der vorgegebenen Termine, Kosten und Qualitäten sicherzustellen. Hier wird das Potential des Einsatzes der Multiagentensimulation erkennbar, da sie in der Lage ist, Ist-Daten effizient zu verarbeiten und damit Soll-Werte für die Kontrolle zur Verfügung zu stellen.

Der Abschnitt 2.1 befasst sich mit der rechnergestützten Simulation als Technik zur Nachbildung und Prognose realer Systeme und dem Konzept des autonomen

Agenten im Allgemeinen. Der Agent wird als selbstständig handelnde Einheit verstanden, die mit ihrer Umwelt interagiert und mit anderen Agenten kommunizieren und kooperieren kann. Darauf aufbauend wird die hier eingesetzte Multiagentensimulation als individuenbasierte Simulation auf Basis eines Multiagentensystems definiert. Sie ist in der Lage, den Bauablauf über die Festlegung des Verhaltens einzelner Agenten, hier Arbeitskräfte und Baugeräte, abzubilden. Damit ist die Aufstellung eines Simulationsmodells als Werkzeug zur Vorhersage des Baufortschritts unter Berücksichtigung unterschiedlicher Ausgangssituationen möglich.

Abschnitt 2.2 behandelt die Anwendung von Ontologien im Sinne der Informatik für die Kommunikation von Softwaresystemen über Termine und Ressourcen von Bauprozessen. Ontologien dienen der semantischen Verknüpfung von Daten und ermöglichen so den verlustfreien Austausch von Informationen. Da mit der W3C-Empfehlung von OWL ein freier Standard zur Verfügung steht, ist es zudem möglich, die Abhängigkeit von proprietären Datenstandards einzelner Softwarehersteller zu umgehen. Als Basis wird die in Darmstadt entworfene Ontologie der Baubetriebswissenschaften verwendet. In ihr werden wichtige baubetriebliche Konzepte in Bezug zum „Prozess“ abgebildet, so dass Daten zu Terminen, Ressourcen, Bauteilen oder Umweltbedingungen über die zugehörigen Leistungserstellungsprozesse verknüpft werden können.

Im Kapitel 3 werden die Theorien und Modelle der Arbeitswissenschaften beschrieben. Das Arbeitssystem, das zur Darstellung eines Arbeitsplatzes mittels Systemelementen und deren Wechselwirkungen unter Einbeziehung der Umwelt dient, wird erläutert, um später als Basis für die agentenbasierte Modellierung genutzt zu werden. Daneben wird die Struktur der Zeitwerte nach REFA dargestellt. Diese dient dazu, die Gesamtdauer der Auftragsbearbeitung in Rüst- und Ausführungszeit zu gliedern und diese wiederum in Grund-, Erhol- und Verteilzeiten zu unterteilen.

Außerdem werden das Belastungs-Beanspruchungsmodell der Ergonomie dargestellt und die Zusammenhänge mit der Ermüdung und des Leistungsangebots betrachtet. Damit ist es möglich, die individuellen Eigenschaften der Arbeitskräfte zu berücksichtigen. Aus diesen und den Belastungen aus der Arbeit und Umwelt lässt sich grundsätzlich sowohl die Ermüdung und die daraus resultierende Erholzeit als auch die Leistungsbereitschaft der Arbeitskräfte ableiten. Allerdings wird deutlich, dass die Modelle der Ergonomie nicht direkt für die baubetriebliche Simulation der Termine und Ressourcen von Bauprozessen nutzbar sind, weshalb ein entsprechendes baubetriebliches Modell entwickelt wurde.

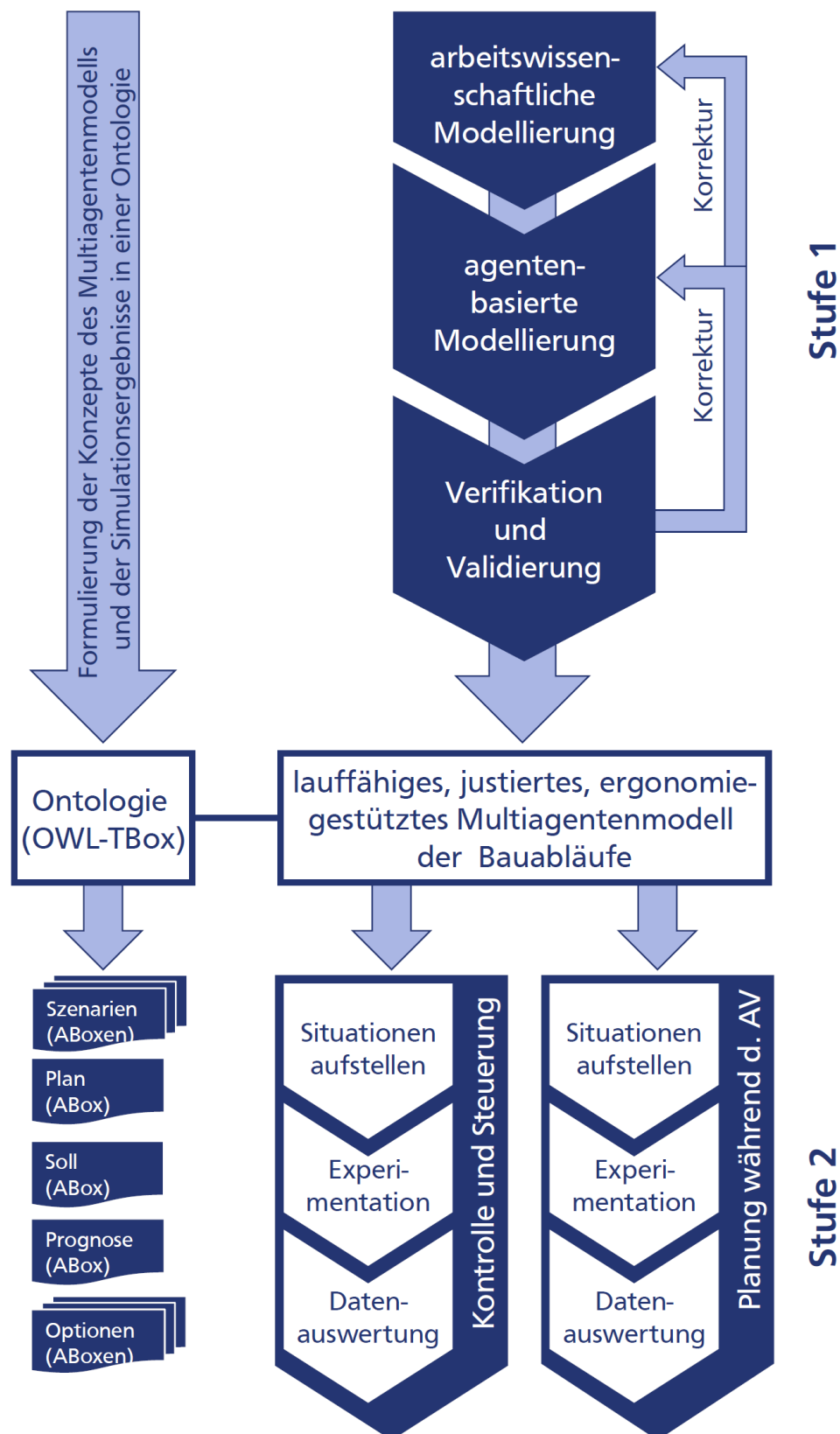


Abbildung 96: Zweistufiges Vorgehensmodell für die ergonomiegestützte Bauablaufsimulation im Baubetrieb

Aufbauend auf diesen Grundlagen wird das in Abbildung 96 dargestellte Vorgehensmodell zur ergonomiegestützten Multiagentensimulation von Montageprozessen im Baubetrieb formuliert. Es besteht aus zwei Stufen, so dass eine Arbeitsteilung zwischen Simulationsexperten und Experten aus der Bauindustrie möglich wird. Die Anbieter von Simulationssoftware entwickeln ein agentenbasiertes Modell des Bauablaufs für die Bauindustrie. Dort wird es in der Arbeitsvorbereitung und für Simulationszwecke in der Bauprozesssteuerung eingesetzt. Im Rahmen der ersten Stufe ist eine Ontologie zu formulieren, deren Anwendung in der zweiten Stufe den Informationsaustausch in Bauprojekten verbessern kann.

In Kapitel 4 wird die erste Stufe des Vorgehensmodells zur Erstellung eines ergonomiegestützten Multiagentenmodells von Montageprozessen beschrieben. Diese besteht aus den vier Schritten der arbeitswissenschaftlichen Modellierung, der Spezifikation und Implementierung des Multiagentenmodells und der Qualitätssicherung dieses Modells sowie der Formulierung einer spezifischen Ontologie. Die abstrakte Modellierung umfasst dabei die agentenbasierte Abbildung des Arbeitssystems sowie ein baubetriebliches Leistungs-Ermüdungsmodell zur Nutzung ergonomischer Erkenntnisse.

Die Überführung der Beschreibung von Montageprozessen als Arbeitssystem in ein Multiagentenmodell ist gut möglich, da sich die eindeutig beschriebenen Elemente des Arbeitssystems in Elemente eines Multiagentensystems transformieren lassen. Es erscheint möglich, die im Rahmen der vorliegenden Arbeit untersuchte Transformation der Arbeitssystemelemente von Montageprozessen auf weitere Arbeitssysteme auf Baustellen zu übertragen. Im Fokus steht die Umwandlung des Arbeitsablaufs und dessen Dauer in das Verhalten eines Agenten. Das Agentenverhalten bildet zunächst die Handlungen jeder Arbeitskraft in Form eines UML-Aktivitätsdiagramms ab, das um eine Darstellung der Kommunikation ergänzt wurde. Die Modellierung des Bauablaufs als Kooperation autonomer Individuen, die auf Basis vorgegebener Handlungsmuster und ihrer Wahrnehmung handeln, bildet technologische und kapazitive Abhängigkeiten ab, indem sie als Regel formuliert werden.

Das in Abschnitt 4.3 beschriebene Leistungs-Ermüdungsmodell soll die Erkenntnisse der Ergonomie über die Leistung und Ermüdung von Arbeitskräften in Abhängigkeit von ihren Eigenschaften und ihrer Belastung für die baubetriebliche Simulation des Bauablaufs nutzbar machen. Dazu wird eine Vielzahl von Zusammenhängen in ein einheitliches Modell, das für die agentenbasierte Simulation geeignet ist, integriert. Das Leistungs-Ermüdungsmodell erlaubt die dynamische Berechnung des Leistungsangebots und dessen Auswirkungen auf die Dauer einer Tätigkeit sowie die Bestimmung der benötigten Erholzeit jeder Arbeitskraft.

Die Implementierung des Multiagentenmodells wird beispielhaft anhand der SeSAM-Modellierungssprachen nach Oechslein durchgeführt. Dabei wird die lauffähige Abbildung des Agentenverhaltens, der Agentenkommunikation, der Umwelt, des Leistungs-Ermüdungsmodells sowie der Pausen und Zusatztätigkeiten beschrieben. Die Qualitätssicherung des Multiagentenmodells beginnt bereits während der Modellierung, um die Plausibilität der Teilmodelle und die Korrektheit der Transformation zwischen den Modellierungsschritten zu prüfen. Nach Fertigstellung des ergonomiegestützten Multiagentenmodells wird dieses mit unterschiedlichen Techniken validiert und verifiziert. Dabei wird die korrekte Abbildung des realen Systems im Normalbereich überprüft respektive justiert und die Plausibilität der Ergebnisse für Extremwerte kontrolliert.

Für die Anwendung der Multiagentensimulation im Baubetrieb wird eine Schnittstelle zum Informationsaustausch benötigt. Hierzu soll die Kommunikation auf Basis von Ontologien dienen. Dieses Format ermöglicht nicht nur, die Daten über eine systemoffene Schnittstelle auszutauschen, sondern sorgt zugleich durch die explizite Darstellung der Semantik für ein gemeinsames Verständnis der Konzepte, zu denen die Daten gehören. Damit handelt es sich auch um eine gute Möglichkeit zur Dokumentation der Daten über den Bauprozess. Deshalb wird parallel zur Erstellung des Multiagentenmodells eine Ontologie-TBox erstellt. Bei der TBox einer Ontologie handelt es sich um die Formulierung der Terminologie einer Domäne in Form abstrakter Konzepte und deren Relationen. Sie dient später als Vorlage, die mit konkreten Daten gefüllt werden kann.

Die zweite Stufe des Vorgehensmodells wird in Kapitel 5 beschrieben. Dabei geht es um die Nutzung der Multiagentensimulation in der Arbeitsvorbereitung sowie für die Kontrolle und Steuerung von Bauprozessen. Dazu werden stets Szenarien zur Beschreibung der Randbedingungen des Bauablaufs festgelegt, die auf Annahmen, Vorhersagen oder Tatsachen beruhen. In der Experimentation wird dann der Plan-, Soll- oder Prognose-Bauablauf berechnet. Für die Auswertung dieser Simulationsergebnisse werden anschließend Kennwerte, Vorgehensweisen und die Aussagekraft des Vergleichs von Plan-, Soll-, Ist- und Prognose-Werten erläutert.

Die Arbeitsvorbereitung nutzt die ergonomiegestützte Simulation der Montageprozesse, um für eine Vielzahl von Szenarien den Bauablauf zu prognostizieren. Beispielsweise ist es durch die Nutzung von statistischen Klimadaten für den Ort der Baustelle möglich, das Terminrisiko infolge von Witterungseinflüssen zu quantifizieren. Außerdem kann durch Szenarien mit variierender Arbeitskräfte- und Geräteanzahl der Ressourceneinsatz bezüglich Bauzeit oder Produktivität optimiert werden. Durch Festlegung der Randbedingungen und des Ressourceneinsatzes werden in der Arbeitsvorbereitung schließlich Plan-Werte für den Bauablauf festgelegt beziehungsweise per Simulation berechnet.

Während der Bauausführung werden die Montageprozesse kontrolliert und gesteuert. Für eine umfassende Kontrolle und Steuerung der Termine und Ressourcen wird hier ein Plan-Soll-Ist-Prognose-Vergleich beschrieben. Die Plan-Daten zum Bauablauf, die auf den Annahmen und Festlegungen der Arbeitsvorbereitung basieren, werden dabei den Soll-Daten, die auf den tatsächlichen Rahmenbedingungen beruhen, gegenübergestellt, um die Auswirkung der Abweichungen zu bestimmen. Zugleich werden die Soll-Daten mit den Ist-Daten zum Bauablauf verglichen, um noch unbekannte Abweichungen zu identifizieren. Außerdem wird die Prognose zum weiteren Bauablauf, die auf aktuellen Vorhersagen und dem bisherigen Baufortschritt basiert, dem geplanten Bauablauf gegenübergestellt. Ergibt der Plan-Prognose-Vergleich, dass der geplante Fertigstellungstermin nicht eingehalten werden kann, so ist über Steuerungsmaßnahmen zu entscheiden. Hier kann die Simulation wiederum eingesetzt werden, um Varianten zur Beschleunigung des Baufortschritts zu vergleichen.

Zum Austausch der Plan-, Soll-, Ist- und Prognose-Daten über den Bauablauf werden die Daten in ABoxen der Ontologie geschrieben. Jede ABox erbt die Konzepte und deren Eigenschaften aus der TBox und füllt diese abstrakte Struktur mit konkreten Daten. Dies kann dazu dienen, Ist-Werte in das Szenario eines Simulationsexperiments einzubinden oder dessen Ergebnisse für den Plan-Soll-Ist-Prognose-Vergleich bereitzustellen.

Im Kapitel 6 wird das Vorgehensmodell zur ergonomiegestützten Multiagentensimulation von Montageprozessen im Baubetrieb angewendet, um die Montage einer modularen Fassadenbekleidung zu simulieren. Dies dient der Überprüfung der Anwendbarkeit sowie Vollständigkeit des Vorgehensmodells und stellt zugleich einen Versuch der Falsifizierung dar. Dabei erweisen sich die vorgegebenen Schritte und zur Verfügung gestellten Hilfsmittel als anwendbar und vollständig, so dass das Vorgehensmodell nicht falsifiziert werden konnte. Vielmehr zeigt sich, dass mit dem zweistufigen Vorgehen die Effizienz und Effektivität der Planung, Kontrolle und Steuerung von Terminen und Ressourcen verbessert werden kann.

Eine höhere Effizienz bei der Termin- und Ressourcenplanung wird durch die rechnergestützte Bauablaufsimulation erzielt, wenn die Simulation mit geringem Aufwand an die konkreten Bauprojekte anpassbar ist und den Bauablauf bei unterschiedlichen Randbedingungen automatisiert prognostiziert. Dies wird im zweistufigen Vorgehensmodell dadurch erreicht, dass die Bauindustrie aus der ersten Stufe ein fertiges Modell erhält, das durch die Definition der Ausgangssituation des Simulationsexperiments angepasst werden kann. Dieses Simulationsmodell enthält die Akteure auf der Baustelle mit modelliertem Verhalten und eigenständiger Kommunikation sowie eine Umwelt, die Umgebungseinflüsse, Anlieferung, Geometrie und Zeit abbildet.

Die Effektivität der Termin- und Ressourcenplanung wird darauf aufbauend erhöht, da es nun möglich ist, eine Vielzahl von Szenarien mit unterschiedlichen Randbedingungen und unterschiedlichem Ressourceneinsatz zu vergleichen. Dadurch kann man die Vor- und Nachteile unterschiedlicher Kombinationen von Monteuren und Transportgeräten erkennen und damit den Ressourceneinsatz optimieren. Außerdem ist es durch die Integration der Ergonomie möglich, den Einfluss der Arbeitsumgebung, der Arbeitsaufgabe und der Eigenschaften der Arbeiter auf die Bauzeit zu quantifizieren. Dies ermöglicht wiederum eine fundierte Risikobewertung hinsichtlich äußerer Einflüsse.

Für die Kontrolle und Steuerung der Montageprozesse kann die ergonomiegestützte Multiagentensimulation schnell den Soll- und Prognose-Baufortschritt auf Basis aktueller Ist-Daten und Vorhersagen berechnen. Außerdem wird es möglich, die Auswirkungen unterschiedlicher Steuerungsoptionen zu berechnen und zu vergleichen. Durch den Einsatz von Ontologien kann darüber hinaus der Datenaustausch bezüglich Terminen, Ressourcen sowie deren Randbedingungen verbessert werden, und man erhält eine Schnittstelle für das Controlling von Bauprojekten. Damit stellt das Vorgehensmodell für die ergonomiegestützte Multiagentensimulation des Bauablaufs und die zugehörige Ontologie einen wichtigen Beitrag zur zeitnahen Steuerung von Bauprozessen dar.

Außerdem sorgt das Vorgehensmodell für eine strukturierte Arbeitsweise bei der Modellierung und dem Simulationseinsatz und ist damit ein wichtiger Faktor für die Sicherung der Simulationsqualität. Als Hilfsmittel werden die Transformation arbeitswissenschaftlicher Systeme in das Multiagentenmodell erläutert und Vorlagen zur Erstellung von Szenarien bereitgestellt.

7.2 Ausblick

Die vorliegende Arbeit beschreibt ein Vorgehen zum Einsatz der Multiagentensimulation im Baubetrieb zur Integration der Ergonomie in die Terminplanung und Nutzung von Ontologien zum Informationsaustausch. Auf Grundlage dieser Ergebnisse ergeben sich folgende zukünftige Forschungsansätze:

- Die Erprobung und weitere Justierung des Leistungs-Ermüdungsmodells mit dem Ziel der Anwendung der ergonomischen Erkenntnisse in der Baupraxis. Dabei sind die Parameter des Leistungs-Ermüdungsmodells anhand von Untersuchungen auf Baustellen zu bestimmen. Dies kann durch detaillierte Untersuchungen zur Leistung von Arbeitskräften mit unterschiedlichen Eigenschaften und bei unterschiedlichen Belastungen erreicht werden.
- Die Erweiterung der agentenbasierten Bauablaufmodellierung zur Integration weiterer bautypischer Verhaltensmuster für die Agenten. Dazu gehören:
 - Bewusste Entscheidungen über die Kooperation durch die Entwicklung von Entscheidungsmustern bei der Kolonnenzusammenstellung,
 - die Kooperation in Kolonnen mit mehreren Arbeitskräften, die Aufgaben in unterschiedlichen Konstellationen ausführen können und
 - die Entwicklung von Verhaltensmustern für die Agenten zur Implementierung einer realitätsnahen Bewegung unter Berücksichtigung von Wegen, Hindernissen oder Gefahrenzonen.
- Die Begleitung der Entwicklung einer agentenbasierten Simulationssoftware für die Bauablaufsimulation. Beispielsweise kann bestehende Simulationssoftware, die in der Logistik und bei der Fertigungsplanung in der stationären Industrie zum Einsatz kommt, weiterentwickelt werden.
- Der Einsatz der Multiagentensimulation für die Arbeitsvorbereitung sowie die Kontrolle und Steuerung von Montagearbeiten bei einem realen Bauprojekt.
- Die Integration der ergonomiegestützten Multiagentensimulation der Bauabläufe in Systeme für das Risikomanagement und die multikriterielle Optimierung von Bauprojekten. Dabei können die im Rahmen dieser Arbeit dargestellten Möglichkeiten zur Nutzung der Ergebnisse der Bauablaufsimulation ergänzt werden, um das gesamte Spektrum möglicher Anwendungen auszuschöpfen und die Durchführung und Auswertung von Simulationsexperimenten aufeinander abzustimmen.

-
- Die Entwicklung von Multiagentenmodellen und deren Einsatzmöglichkeiten für weitere Leistungserstellungsprozesse auf Baustellen. Als besonderes interessant erscheinen hier:
 - Die Baulogistik, insbesondere die Baustellenlogistik auf beengten Baufeldern im Innenstadtbereich,
 - die Herstellung des Rohbaus, vor allem die Taktfertigung im Ort betonbau sowie
 - die Gewerke im Ausbau und deren Koordination.
 - Die Integration von Schnittstellen zum Einlesen von CAD-Daten sowie Regelungen zur Beschreibung technologischer Abhängigkeiten einzelner Prozesse auf der Baustelle in ein ergonomiegestütztes Multiagentenmodell zur Bauablaufsimulation.
 - Die Weiterentwicklung des Einsatzes von Ontologien zum Informationsaustausch in der baubetrieblichen Forschung und der Praxis im Bauwesen, zum Beispiel für die zeitnahe Bauprozesssteuerung.

Glossar wichtiger IT-Begriffe

ABox – assertional box

Beschreibung der konkreten Instanzen eines Konzeptes bzw. einer Klasse, die in einer TBox definiert sind.²¹⁷

Agent

Ein Agent ist eine Software, die eigenständig in einer Umwelt existiert und auf diese kontinuierlich und ihren eigenen Zielen folgend reagiert.²¹⁸

FIPA - Foundation for Intelligent Physical Agents

Standardisierungsorganisation zur Förderung agentenbasierter Technologien und deren Interoperabilität mit anderen Technologien.²¹⁹

Instanz

Konkrete Ausprägung eines Konzepts respektive einer Klasse.²²⁰

Interoperabilität

Plattformübergreifende Fähigkeit zur Kooperation von IT-Systemen.²²¹

Klasse

Gesamtheit von Objekten, die identische Merkmale aufweisen. Diese können unter anderem durch Vererbung und Instanziierung weitergegeben werden.²²²

²¹⁷ Vgl. Hitzler et al (2008): Semantic Web. S. 167

²¹⁸ Vgl. Franklin, Graesser (1996): Is it an agent or just a program, S. 25

²¹⁹ Vgl. FIPA: www.fipa.org, Aufruf: 21.9.2010

²²⁰ Vgl. Fischer, Hofer (2008): Lexikon der Informatik, S. 409

²²¹ Vgl. ebenda. S. 412

²²² Vgl. ebenda, S. 452 f.

Ontologie

Ontologien in der Informatik sind explizite Spezifikationen einer gemeinsamen Konzeptualisierung.²²³

OWL – Web Ontology Language

Vom W3C empfohlene Sprache zur Definition und Instanziierung von Ontologien im Internet. Sie besteht aus Klassen, Properties und deren Instanzen.²²⁴

Property

Relation zwischen zwei Objekten. Properties werden in RDF an der Prädikatsstelle von Tripeln verwendet.²²⁵

Proprietär

Spezifikationen, die vom Hersteller nicht publiziert werden oder gar Lizenzpflichtig sind. Gegenteil: offen.²²⁶

RDF – Resource Description Framework

Standardmodell zum Datenaustausch im Internet. Nutzt Triple zur Beschreibung der Beziehung von Daten.²²⁷

Simulation

Nachbildung eines realen Systems in einem experimentierfähigen Modell, um Erkenntnisse über das reale System zu erhalten.²²⁸

TBox

Speicherung des terminologischen Schemawissens, also der Konzepte bzw. Klassen einer Wissensdomäne.²²⁹

²²³ Vgl. Gruber (1993): Toward Principles for the Design of Ontologies [...]

²²⁴ Vgl. Smith et al (2004): OWL Web Ontology Language Guide

²²⁵ Vgl. Hitzler et al (2008): Semantic Web, S. 74

²²⁶ Vgl. Fischer, Hofer (2008): Lexikon der Informatik, S. 656

²²⁷ Vgl. RDF Working Group (2004): Resource Description Framework

²²⁸ VDI 3633 (12/1993): Simulation von Logistik-, Materialfluß- und Produktionssystemen, S. 3

²²⁹ Vgl. Hitzler et al (2008): Semantic Web, S. 167

Triple

Bei einem RDF-Triple verknüpft ein Prädikat ein Subjekt mit einem Objekt.²³⁰

UML – Unified Modeling Language

Graphische Standardsprache zur visuellen Spezifikation und Dokumentation von objektorientierten Systemen.²³¹

Vererbung

Automatische Weitergabe von Eigenschaften in einer Eltern-Kind-Beziehung.²³²

W3C – World Wide Web Consortium

Konsortium zur Normung im Internet.²³³

XML – Extensible Markup Language

Vom W3C empfohlene Auszeichnungssprache, die als Datenstruktursprache dient und ein Standard beim Datenaustausch ist.²³⁴

²³⁰ Vgl. Hitzler et al (2008): Semantic Web, S. 40.???

²³¹ Vgl. Fischer, Hofer (2008): Lexikon der Informatik, S. 872

²³² Vgl. ebenda, S. 896

²³³ Vgl. ebenda, S. 941

²³⁴ Vgl. ebenda, S. 951 f.

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Konzept für ein zweistufiges Vorgehensmodell zur Implementierung eines Multiagentenmodells und zur Einbindung der Ergebnisse in Ontologien...	5
Abbildung 2: Schema zum strukturierten Vorgehen während der Forschungsarbeit	7
Abbildung 3: Gliederung dieser Forschungsarbeit.....	8
Abbildung 4: Ablauf der Termin- und Ressourcenplanung.....	15
Abbildung 5: Ablauf der Kontrolle und Steuerung eines Bauprozesses	17
Abbildung 6: Zusammenhang zwischen Realität und Modell in der Simulation...	20
Abbildung 7: Vorgehensweise bei der Simulation nach VDI-Richtlinie 3633	23
Abbildung 8: Qualitätsbegriffe in der Simulation.....	25
Abbildung 9: Eigenschaften autonomer Software-Agenten	28
Abbildung 10: FIPA - Contract Net Interaction Protocol.....	34
Abbildung 11: Phasen des Vorgehensmodells nach Oechslein.....	38
Abbildung 13: W3C-Datenstruktur dargestellt als "Semantic Web Layer Cake"	44
Abbildung 14: Sieben Schritte zur Aufstellung einer Ontologie nach Noy und McGuinness.....	47
Abbildung 15: Beispiel einer SPARQL-Anfrage an eine ABox der Baubetrieb-Ontologie	52
Abbildung 16: Modellierung des Konzepts „Produktionsprozesse“	54
Abbildung 17: Das REFA-Arbeitssystem	58
Abbildung 18: Gliederung der Auftragszeit nach REFA.....	59
Abbildung 19: Belastungs-Beanspruchungsmodell	61
Abbildung 20: Mechanisches Ersatzmodell des Belastungs-Beanspruchungsmodells	63
Abbildung 21: Leistungsangebot und menschliche Leistung nach REFA	65
Abbildung 22: Modellierungsschritte in der ersten Stufe des Vorgehensmodells..	72
Abbildung 23: Arbeitssystem der Montage und Baustellenlogistik zur agentenbasierten Modellierung	73

Abbildung 24: Modell der Ermüdung und des Leistungsangebots sowie deren Auswirkungen auf Grund- und Erholzeiten	78
Abbildung 25: Ableitung der Teilbelastung infolge Temperatur entsprechend der Aufwandswerteveränderung für Mauerarbeiten nach Fetzner.....	83
Abbildung 26: Modellierung der Teilbelastung in Anlehnung an die physiologische Arbeitskurve nach Graf.....	84
Abbildung 27: Kraftperzentile nach DIN 33411-5 Tab. 14 als möglicher Indikator der körperlichen Belastbarkeit einer Arbeitskraft	86
Abbildung 28: Abschneiden unterschiedlicher Personengruppen beim Aufmerksamkeitstest INKA.....	86
Abbildung 29: Zusammenhänge der ergonomischen Einflussgrößen, Zeitgrößen und des Multiagentenmodells	89
Abbildung 30: Teilaspekte der Spezifikation und Implementierung des Multiagentenmodells des Bauablaufs	93
Abbildung 31: UML-Aktivitätsdiagramm des Grundzyklus eines Monteuragenten.....	95
Abbildung 32: UML-Aktivitätsdiagramm des Grundverhaltens eines Transportagenten.....	96
Abbildung 33: Aktivität zur Modellierung einer Tätigkeit mit Tätigkeitsdauer	97
Abbildung 34: Implementierung der Anfahrt eines Transportagenten in SeSAM-IMPL.....	98
Abbildung 35: Zustandsvariablen eines Fertigteils und deren Manipulation.....	99
Abbildung 36: Umsetzung des FIPA-ContractNet Interaction Protocol.....	101
Abbildung 37: Reservierung und Kommunikation im Aktivitätsdiagramm des Montageagenten in SeSAM	102
Abbildung 38: UML-Aktivitätsdiagramm der Anlieferung von Fertigteilen	104
Abbildung 39: Beispielhafte Implementierung der Erzeugung von Fertigteilen durch die Umwelt in SeSAM	106
Abbildung 40: Funktionen zur Bestimmung der ergonomischen Parameter in SeSAM	109
Abbildung 41 : Ergänzung des Grundzyklus um Erholpausen und Zusatztätigkeiten	110
Abbildung 42: Zusammenhänge der abstrakten Modelle für ein agentenbasiertes Bauablaufmodell als Basis zur Verifikation	112
Abbildung 43: Verlauf der Ermüdung infolge Beanspruchung und Erholpausen	113
Abbildung 44: Gegenüberstellung der theoretischen Grunddauer und der Grunddauer unter Berücksichtigung des Einarbeitungseffekts und der Tagesganglinie	117

Abbildung 45: Verlauf des Lernfortschritts nach Anzahl der Tätigkeitswiederholungen bei unterschiedlichen Parametern der Lernkurve ..	118
Abbildung 46: Justierung der Erholzeit-Anteile über den Erholwert des Monteurs.....	120
Abbildung 47: Verteilung der Bestandteile der Gesamtdauer bei verschiedenen Extremszenarien im Vergleich zu Standardbeanspruchung – ohne Verteilzeiten	121
Abbildung 48: Abhängigkeit des Aufwandswerts von der Temperatur	123
Abbildung 49: Anteil der sachlichen Verteilzeit bezogen auf die Grundzeit in Abhängigkeit von den Baustellenbedingungen	124
Abbildung 50: Auswirkung der Zusatztätigkeit in Abhängigkeit vom Auslastungsgrad eines Agenten	125
Abbildung 51: Hierarchie der Ontologien	127
Abbildung 52: Struktur der Daten eines Szenarios in einer ABox der Task- Ontologie	129
Abbildung 53: Zuordnung der ergonomischen Parameter in der Task-Ontologie	130
Abbildung 54: Eingangsparameter und Ergebnisse einer Multiagentensimulation von Montageprozessen im Bauwesen	131
Abbildung 55: Erzeugung einer ABox mit Ergebnissen eines Simulationsexperiments	132
Abbildung 56: Eigenschaften eines nach der ersten Stufe des Vorgehensmodells entwickelten Modells der Bauabläufe	135
Abbildung 57: Zweite Stufe des Vorgehensmodells zur ergonomiegestützten Multiagentensimulation von Montageprozessen und des Datenaustauschs.....	138
Abbildung 58: Anwendungsfälle für Simulationsexperimente gegliedert nach Zeitpunkt und Nutzung der Simulationsergebnisse	139
Abbildung 59: Stufenweises Vorgehen zur Aufstellung einer projektbezogenen Situation als Szenario für den Bauablauf.....	143
Abbildung 60: Modellierter Temperaturverlauf für den Mittelwert und vier Quantile im April.....	145
Abbildung 61: Statistische Werte der mittleren Tagestemperatur am Flughafen in Frankfurt/Main von 1979 bis 2009	146
Abbildung 62: Modellierter Temperaturverlauf für den Mittelwert und vier Quantile über das gesamte Jahr	146
Abbildung 63: Vorgehensschritte zur Auswertung der Simulationsexperimente	148
Abbildung 64: Einflussgrößen auf den Plan-Baufortschritt	154

Abbildung 65: Ist-Daten und Basis-Werte zur Ermittlung des Soll-Baufortschritts	158
Abbildung 66: Einflussgrößen auf den Prognose-Baufortschritt.....	159
Abbildung 67: Optionen zur Beeinflussung des Baufortschritts	160
Abbildung 68: Datenquellen zur Bestimmung der Plan-, Soll-, Ist- und Prognose-Werte zum Baufortschritt.....	161
Abbildung 69: Anfragen unterschiedlicher Daten aus der ABox.....	162
Abbildung 70: Gegenüberstellung von Werten im Rahmen eines Plan-Soll-Ist-Prognose-Vergleichs zum Baufortschritt.....	163
Abbildung 71: Explosionszeichnung des Fassadensystems.....	167
Abbildung 72: Prozesse zur Montage der Fassadenmodule	168
Abbildung 73: Gebäudegrundriss mit 30 Fassadenmodulen	169
Abbildung 74: Arbeitsablauf bei Transport und Befestigung eines Fassadenmoduls.....	170
Abbildung 75: Spezifikation und Implementierung des Verhaltens des Monteurs zur Fassadenmodulmontage in SeSAm	171
Abbildung 76: Bildschirmfoto der Animation eines Simulationsexperiments mit dem agentenbasierten Modell der Fassadenmontage	173
Abbildung 77: Zeitlicher Verlauf der Ermüdung einer Arbeitskraft infolge Arbeitsbelastungen und Erholpausen	174
Abbildung 78: Gegenüberstellung der Simulationsergebnisse mit den Grunddauern	175
Abbildung 79: Vergleich der Simulationsergebnisse und Rechenwerte hinsichtlich des Lernfortschritts	176
Abbildung 80: Prozentuale Veränderung der Montagedauer gegenüber der Dauer bei 15 bis 20°C im Rahmen der Justierung der Temperaturbelastung mit dem Faktor t	177
Abbildung 81: Aufteilung der Gesamtdauer der Fassadenmontage bei Szenarien mit unterschiedlichen ergonomischen Einflussfaktoren.....	178
Abbildung 82: Anteil der Zusatztätigkeiten und Wartezeiten an der Gesamtdauer bei einer Kolonne bestehend aus einem Monteur und einem Stapler	179
Abbildung 83: Anteil der Zusatztätigkeiten und Wartezeiten an der Gesamtdauer bei einer Kolonne bestehend aus zwei Monteuren und einem Stapler.....	179
Abbildung 84: Veränderung der Gesamtdauer mit und ohne Zusatzdauern bei verschiedenen Kolonnenzusammensetzungen.....	180
Abbildung 85: Darstellung eines Simulationsexperiments in SeSAm	183
Abbildung 86: Gesamtdauer der Fassadenmontage bei 50 Szenarien	184

Abbildung 87: Gegenüberstellung des Aufwandswerts und der Gesamtdauer bei unterschiedlichem Ressourceneinsatz.....	186
Abbildung 88: Abweichungen der Gesamtdauer bei den Jahres-Temperaturquantilen von der Gesamtdauer beim Mittelwert	187
Abbildung 89: CSV-Quelldateien von SeSAM und OWL-ABox im XML-Format ..	189
Abbildung 90: Stundenweise Darstellung unterschiedlicher Baufortschritte am ersten Arbeitstag	191
Abbildung 91: Tageweise Darstellung nach Plan und für Beschleunigungsoptionen.....	192
Abbildung 92: Plan-Soll-Ist-Vergleich und Plan-Prognose-Vergleich am Ende des ersten Arbeitstages	193
Abbildung 93: Plan-Soll-Ist-Vergleich und Plan-Prognose-Vergleich am Ende des 2. AT	194
Abbildung 94: Plan-Soll-Ist-Vergleich und Plan-Prognose-Vergleich am Ende des vierten Arbeitstages.....	194
Abbildung 95: Screenshot eine SQWRL-Abfrage in Protégé	195
Abbildung 96: Zweistufiges Vorgehensmodell für die ergonomiegestützte Bauablaufsimulation im Baubetrieb.....	205

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2: V&V-Tests für die baubetriebliche Simulation	26
Tabelle 3: Übertragung des REFA-Arbeitssystems in ein Multiagentenmodell	75
Tabelle 4: Gegenüberstellung der Aktivitäten des Multiagentenmodells mit den Ablauf- und Zeitarten nach REFA.....	76
Tabelle 5: Einflussgrößen der Teilbelastungen und Eigenschaften	88
Tabelle 6: Zuordnung und Veränderlichkeit der Einflussgrößen und Parameter..	90
Tabelle 7: Gegenüberstellung arbeitswissenschaftlicher Konzepte und deren baubetriebliche Modellierung für die Ermittlung der Leistung von Arbeitskräften	91
Tabelle 8: Übersicht der Modellvariablen zur Sensitivitätsanalyse.....	115
Tabelle 9: Ermittlung von Dauern mit Berechnungsformeln und aus Simulationsergebnissen.....	119
Tabelle 10: Gegenüberstellung ausgewählter Daten in der Ausgabedatei der Situation mit den zugehörigen Ontologiekonzepten	133
Tabelle 11: Gegenüberstellung ausgewählter Daten in der Ausgabedatei der Bauelemente (Fertigteile) mit den zugehörigen Ontologiekonzepten in der ABox	134
Tabelle 12: Präfixe zur Kennzeichnung von Dateien mit Simulationsergebnissen.....	141
Tabelle 13: Statistische Temperaturwerte für Frankfurt/Main Flughafen für den Zeitraum 1979 bis 2009	144
Tabelle 14: Übersicht über die Variablen zur Dokumentation der Simulationsläufe	149
Tabelle 15: Kennwerte für die Optimierung des Ressourceneinsatzes	152
Tabelle 16: Kennwerte für die Risikoanalyse bezüglich des Baufortschritts bei extremen Temperaturen.....	153
Tabelle 17 : Einfluss einzelner Zustandsvariable auf die Gesamtdauer.....	174
Tabelle 18: Statistische Temperaturwerte für die Szenarien der Fassadenmontage.....	181
Tabelle 19: Stereotypen von Bauarbeitern mit Eigenschaftswerten.....	181
Tabelle 20: Szenarien für die Fassadenmontage in einem definierten Zeitraum	182

Tabelle 21: Simulationsergebnisse über das ganze Jahr und deren Auswertung	185
Tabelle 22: Auswertung der Simulationsergebnisse für die Risikoanalyse bezüglich der Witterungseinflüsse	187
Tabelle 23: Eingangswerte der Szenarien für die Simulationsexperimente zum Zeitpunkt "Ende des ersten Arbeitstags"	190
Tabelle 24: Eingangswerte und Ergebnisse der Simulationsexperimente zur Überprüfung von Optionen zur Beschleunigung des Baufortschritts	193
Tabelle 25: Umsetzung der Modellierungsaspekte bei der Fassadenmodulmontage	196
Tabelle 28: Ein- und Ausgabedaten unterschiedlicher Simulationsexperimente im Rahmen des Controllings entsprechend dem Vorgehensmodell	202
Tabelle 29: Baufortschritts-Vergleiche nach dem Vorgehensmodell	202

Formelverzeichnis

Formel 1: Berechnung der Beanspruchungen	79
Formel 2: Berechnung der Ermüdung.....	79
Formel 3: Berechnung des Ermüdungsfaktors	79
Formel 4: Mathematische Formulierung des Leistungsangebots	80
Formel 5: Berechnung der Grundzeit	80
Formel 6: Berechnung der Einübung mit Hilfe von Lernkurven.....	87
Formeln 7: Gleichungen zur Berechnung der Montage- und Zusatzdauer	150
Formeln 8: Berechnung des Zeitraums zwischen zwei Fertigteil-Montagen.....	150
Formeln 9: Berechnung der Kennwerte für ein Szenario	151

Abkürzungsverzeichnis

AAWS	Automotive Assembly Worksheet
AT	Arbeitstag
AVOR	Arbeitsvorbereitung
BRTV	Bundesrahmentarifvertrag
CSV	comma separated values
d.h.	das heißt
DAML	DARPA Agent Markup Language
DIN	Deutsches Institut für Normung
EN	Europäische Norm
et al	et alii, et aliae, et alia
etc.	et cetera
f.	folgende
ff.	fortfolgende
FIPA	Foundation for Intelligent Physical Agents
ggf.	gegebenenfalls
i.d.R.	in der Regel
INKA	Inventar Komplexer Aufmerksamkeit
ISO	Internationale Organisation für Normung

IT	Informationstechnologie
Jess	Java Expert System Shell
LKW	Lastkraftwagen
OIL	Ontology Interface Layer
OWL	Web Ontology Language
RDF	Resource Description Framework
REFA	Eigenname, ehemals: „Reichsausschuß für Arbeitszeitermittlung“
SeSAm	Shell for Simulated Agent Systems
SPARQL	SPARQL Protocol and RDF Query Language
SQWRL	Semantic Query-enhanced Web Rule Language
SWRL	Semantic Web Rule Language
UML	Unified Modeling Language
VDI	Verein Deutscher Ingenieure
vgl.	vergleiche
W3C	World Wide Web Consortium
XML	Extensible Markup Language
XSLT	Extensible Stylesheet Language
z.B.	zum Beispiel

Quellenverzeichnis

Allemang, Dean; Hendler, Jim: *Semantic Web for the working ontologist*; Elsevier Verlag, Burlington, 2008

Altova: *SemanticWorks – Semantic Web tool, Visual RDF and OWL editor*; <http://www.altova.com/semanticworks.html>, Aufruf am 10.11.2009

Antoniou, Grigoris; van Harmelen, Frank: *A Semantic Web Primer*; The MIT Press, Cambridge, London, 2004

Bachmann, Hubert; Steinle, Alfred; Hahn, Volker: *Bauen mit Betonfertigteilen im Hochbau*. In: Bergmeister, Konrad; Fingerloos, Frank; Wörner, Johann-Dietrich (Hrsg.): *BetonKalender 2009*, Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, 2009

Bargstädt, Hans-Joachim; Steinmetzger, Rolf: *Grundlagen des Baubetriebswesens*; Eigenverlag, Bauhaus Universität Weimar, 2008

Bauer, Hermann: *Baubetrieb*; 3. Auflage, Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, 2007

Berg, Gerhard: *REFA in der Baupraxis – Teil 1: Grundlagen*; ztv Verlag, Frankfurt/Main, 1984

Bergmann, Matthias; Gatzweiler, Marc; Lenz, Bernhard: *Entwicklung eines modularen Fassadenbekleidungssystems für Wohnsiedlungsbauten aus der Nachkriegszeit*; Eigenverlag der TU Darmstadt, 2008

Brüssel, Wolfgang: *Baubetrieb von A bis Z*; 5. Auflage, Werner Verlag, Köln, 2007

Bubenik, Alexander: *Die Fassade und ihr Einfluss auf die schlüsselfertige Bauausführung*; Driesen Verlag, Taunusstein. Zugleich: Dissertation, TU Darmstadt, 2001

Bungartz, Hans-Joachim; Zimmer, Stefan; Buchholz, Martin; Pflüger, Dirk: *Modellbildung und Simulation*; Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, 2008

Connolly, Dan et al: *Web-Ontology (WebOnt) Working Group*; W3C, 2001, <http://www.w3.org/2001/sw/WebOnt/>, Aufruf: 6.11.2009

Charour, Racha: *Integration von Simulation und CAD auf Basis von Produktmodellen im Erdbau*; kassel university press, Kassel, 2006. Zugleich: Dissertation Universität Kassel

de Greiff, Malte: *Die Prognose von Lernkurven in der manuellen Montage unter besonderer Berücksichtigung der Lernkurven von Grundbewegungen*; VDI Verlag, Düsseldorf, 2001. Zugleich: Dissertation, Universität Duisburg

DIN EN ISO: *Qualitätsmanagementsysteme – Grundlagen und Begriffe*; DIN EN ISO 9000, Dezember 2005

DWD: *Klimadaten – Tageswerte, Station 10637 Frankfurt/Main Flughafen*; http://www.dwd.de/bvbw/appmanager/bvbw/dwdwwwDesktop?_nfpb=true&_windowLabel=T82002&_urlType=action&_pageLabel=_dwdwww_klima_umwelt_klimadaten_deutschland, Aufruf: 11.02.2010

Ferber, Jacques: *Multiagentensysteme – Eine Einführung in die Verteilte Künstliche Intelligenz*; Übersetzung: Kirn, Stefan; Addison-Wesley Verlag, München, 2001

Fetzner, Torsten: *Ein Verfahren zur Erfassung von Minderleistungen aufgrund witterungsbedingter Bauablaufstörungen*; Eigenverlag, TU Darmstadt, 2007. Zugleich: Dissertation, TU Darmstadt

FIPA: *Contract Net Interaction Protocol Specification*; <http://www.fipa.org/specs/fipa00029/SC00029H.pdf>, Aufruf: 17.07.2008

FIPA: *Vorwort der Homepage*; www.fipa.org, Aufruf: 21.09.2010

Fischer, Peter; Hofer, Peter: *Lexikon der Informatik*; Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, 2008

Franklin, Stan; Graesser, Art: *Is It an Agent, or Just a Program? – A Taxonomy for Autonomous Agents*. In: *Intelligent Agents III*, Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, 1996

Franz, Volkard: *Vorwort des Herausgebers*. In: Franz, Volkard (Hrsg.): *1. IBW-Workshop – Simulation in der Bauwirtschaft*, Kassel university press, Kassel, 2007

Gasevic, Dragan; Djuric, Dragan; Devedzic, Vladan: *Model Driven Engineering and Ontology Development*; Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, 2. Auflage, 2009

Girmscheid, Gerhard: *Leistungsermittlungshandbuch für Baumaschinen und Bauprozesse*; 3. Auflage, Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, 2005

Girmscheid, Gerhard; Motzko, Christoph: *Kalkulation und Preisbildung in Bauunternehmen*; Springer-Verlag, Berlin Heidelberg 2007

Gomez-Perez, Asuncion; Fernandez-Lopez, Mariano; Corcho, Oscar: *Ontological Engineering*; Springer Verlag, London, 2004

Graf Otto: *Begriff der Leistungsbereitschaft*. In: Zentralblatt Arbeitswissenschaft; Kinau Verlag, Lüneburg, 8/1954, S. 141-144

Griebel, Bernhard: *Der zeitnahe Soll-Ist-Vergleich aus Sicht der Baustelle*; Mensch & Buch Verlag, Berlin. Zugleich: Dissertation, TU Darmstadt, 2000

Gruber, Thomas: *Toward Principles for the Design of Ontologies Used for Knowledge Sharing*. In: International Journal Human-Computer Studies, Elsevier Verlag, Burlington, Vol. 43, S. 907-928, 1993

Gruninger, Michael; Lee, Jintae: *Ontology – Applications and Design*. In: Communications of the ACM, ACM, New York, Vol. 45:2, 2002

Guarino, Nicola: *Formal Ontology and Information Systems*. In: Proceedings of FOIS'98, IOS press, Amsterdam, S. 3-15, 1998

Haide, Jenny: *Methode zur Quantifizierung der Einflüsse auf Vorgangsdauern lohnintensiver Arbeiten am Beispiel von Pflasterarbeiten*; Eigenverlag, Universität Rostock, 2008. Zugleich: Dissertation, Universität Rostock

Heyde, Gerd: *Entwicklung zweier psychometrischer Leistungstests und Validierung ihrer Messgegenstände mit Hilfe eines Modells des menschlichen Gedächtnisses*; Eigenverlag. Zugleich: Dissertation, TU Darmstadt, 2006

Heim, Marc: *Die zeitnahe Leistungsfeststellung von Baustellen*; Cuvillier Verlag, Göttingen. Zugleich: Dissertation, TU Darmstadt, 2002

Hesse, Wolfgang: *Ontologie(n)*. In: Informatik Spektrum, Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, S. 477-480, Dez. 2002

Hitzler, Pascal; Krötzsch, Markus; Rudolph, Sebastian; Sure, York: *Semantic Web*; Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, 2008

Holland, John: *Emergence – From Chaos to Order*; Addison Wesley, Redwood City, 1998

Horridge, Matthew; Knublauch, Holger; Rector, Alan; Stevens, Robert; Wroe, Chris: *A Practical Guide To Building OWL Ontologies Using The Protege-OWL Plugin*

and CO-ODE Tools; University of Manchester, 2004, http://owl.cs.manchester.ac.uk/tutorials/protegeowltutorial/resources/ProtegeOWLTutorialP3_v1_0.pdf, Aufruf: 08.12.2009

Horváth, Péter: *Controlling*; 11. Auflage, Verlag Franz Vahlen, München, 2009

Huhnt, Wolfgang; Richter, Sven: *Eine Modellierungsmethodik für Ausführungspläne im Praxistest*. In: Bargstädt, Hans-Joachim [Hrsg.]: *Modellierung von Prozessen zur Fertigung von Unikaten*; S. 85-90, Bauhaus Universität Weimar, Eigenverlag, 2010

IPE, AIFB, IMG: *KAON2 (KARlsruhe ONtology)*; Karlsruhe, Manchester, <http://kaon2.semanticweb.org/>, Aufruf: 06.07.2010

Jennings, Nicholas; Sycara, Katia; Wooldridge, Michael: *A Roadmap of Agent Research and Development*. In: *Autonomous Agents and Multi-Agent Systems*, Kluwer Academic Publishers, Boston, 1998

Kaiser, Stefan: *Einflüsse der Ergonomie auf Vorgabezeiten im Baubetrieb*; Diplomarbeit, TU Darmstadt, 2009

Kay, Michael (Hrsg.): *XSL Transformations (XSLT) Version 2.0*; W3C <http://www.w3.org/TR/2007/REC-xslt20-20070123/>, 2007, Aufruf: 12.11.2009

Kessler, Hermann: *Der Plan-Soll-Ist-Vergleich mit einem Nachweis zeitvariabler Kostenänderungen bei einer Bauzeitverschiebung*; Eigenverlag. Zugleich: Dissertation, TH Darmstadt, 1985

Klügl, Franziska: *Multiagentensimulation*; Addison-Wesley Verlag, München, 2001

Klügl, Franziska; Oechslein, Christoph; Puppe, Frank; Dornhaus, Anna: *Multi-agent modelling in comparison to standard modelling*. In: *Artificial Intelligence*, SCS Publishing House, Erlangen, 2002, S. 105-110

Knaack, Ulrich; Klein, Tillman; Bilow, Marcel; Auer, Thomas: *Fassaden – Prinzipien der Konstruktion*; Birkhauser Verlag, Basel, 2007

Kochendörfer, Bernd; Liebchen, Jens; Viering, Markus: *Bau-Projekt-Management*; Teubner Verlag, Wiesbaden, 4. Auflage, 2010

Kornmeier, Martin: *Wissenschaftstheorie und wissenschaftliches Arbeiten*; Physica-Verlag, Heidelberg, 2007

Kugler, Martin: *Entwurf eines multiagentenbasierten Referenzmodells für Simulationen im Hochbau.* In: Franz, Volkard (Hrsg.): 1. IBW-Workshop – Simulation in der Bauwirtschaft, Kassel university press, Kassel, 2007

Kugler, Martin: *Prozessdatenmodell für die Simulation.* In: Tagungsband des 20. Assistententreffen der Bereiche Bauwirtschaft, Baubetrieb und Bauverfahrenstechnik, Kassel university press, Kassel, 2009

Künstner, Gerhard: *REFA in der Baupraxis – Teil 2: Datenermittlung;* ztv Verlag, Frankfurt/Main, 1984

Landau, Kurt: *Zur Belastung, Beanspruchung und Arbeitsgestaltung beim Vermauern großformatiger Kalksandsteine.* Forschungsvereinigung „Kalk-Sand“ e.V. Hannover, 1984

Lang, Andreas: *Ein Verfahren zur Bewertung von Bauablaufstörungen und zur Projektsteuerung;* VDI Verlag, Düsseldorf, 1987. Zugleich: Dissertation, TH Darmstadt

Laurig, Wolfgang: *Grundzüge der Ergonomie;* Beuth Verlag, Berlin, Köln, 1992

Lehrstuhl für Künstliche Intelligenz und Angewandte Informatik: *Homepage der Simulationsumgebung SeSAM;* www.simsesam.de; Aufruf: 05.07.2010

Lotter, Bruno; Wiendahl, Hans-Peter [Hrsg.]: *Montage in der industriellen Produktion;* Springer Verlag, Berlin, 2006

Ludewig, Siegfried: *Montagebau;* 2. Auflage, VEB Verlag für Bauwesen, Berlin, 1975

McGuinness, van Harmelen [Hrsg.]: *OWL Web Ontology Language Overview,* W3C, 2004, <http://www.w3.org/TR/2004/REC-owl-features-20040210/>, Aufruf: 06.11.2009

Michel, Fabien; Ferber, Jacques; Drogoul, Alexis: *Multi-Agent Systems and Simulation – A Survey from the Agent Community's Perspective.* In: Multi-Agent Systems, CRC Press, Boca Raton, 2009, S. 3-51

MIND lab: *SWOOP – Semantic Web Ontology Editor;* <http://code.google.com/p/swoop/downloads/list>, Aufruf: 10.11.2009

Motzko, Christoph: *Ein Verfahren zur ganzheitlichen Erfassung und rechnergestützten Einsatzplanung moderner Schalungssysteme;* VDI Verlag, Düsseldorf, 1990. Zugleich: Dissertation, TH Darmstadt

Motzko, Christoph; Mehr, Oliver; Bergmann, Matthias: *Echtzeitsteuerung von Bauprozessen*; In: Institut für Baubetrieb und Bauwirtschaft (Hrsg.): Die wirtschaftliche Seite des Bauens, Schriftenreihe des Instituts für Baubetrieb und Bauwirtschaft, Braunschweig 2010

Motzko, Christoph; Mehr, Oliver; Bergmann, Matthias; Boska, Erik; Boska, Penelope: *Eine Ontologie für die Baubetriebswissenschaft*. In: Bargstädt, Hans-Joachim [Hrsg.]: Modellierung von Prozessen zur Fertigung von Unikaten; S. 85-90, Bauhaus Universität Weimar, Eigenverlag, 2010

Motzko, Christoph; Pflug, Christoph: *Informationsgewinnung aus Bildern im Baubetrieb*; In: Festschrift 40 Jahre Institut für Baubetrieb und Bauwirtschaft, Technische Universität Graz, 2009

North, Klaus; Güldenberger, Stefan: *Produktive Wissensarbeit(er)*; Gabler Verlag, Wiesbaden, 2008

Noy, Natalya; McGuinness, Deborah: *Ontology Development 101: A Guide to Creating Your First Ontology*; <http://www-ksl.stanford.edu/people/dlm/papers/ontology-tutorial-noy-mcguinness.pdf>, Aufruf: 05.07.2010

O'Connor, Martin: *The Semantic Web Rule Language*, 2009, BMRI Stanford University, Tutorialunterlagen zur 11th Protégé Conference Amsterdam

Oechslein, Christoph: *Vorgehensmodell mit integrierter Spezifikations- und Implementierungssprache für Multiagentensimulationen*; Shaker Verlag, Aachen, 2004. Zugleich: Dissertation, Universität Würzburg

Oepen, Ralf-Peter: *Phasenorientiertes Bauprojekt-Controlling in bauausführenden Unternehmen*; Eigenverlag. Zugleich: Dissertation, TU Bergakademie Freiberg, 2002

Pflug, Christoph: *Ein Bildinformationssystem zur Unterstützung der Bauprozesssteuerung*; Eigenverlag, Institut für Baubetrieb, TU Darmstadt. Zugleich: Dissertation, TU Darmstadt, 2009

Prud'hommeaux, Eric; Seaborne, Andy: *SPARQL Query Language for RDF*, 2008, <http://www.w3.org/TR/2008/REC-rdf-sparql-query-20080115/>, Aufruf: 12.11.2009

Rabe, Markus; Spieckermann, Sven; Wenzel, Sigrid: *Verifikation und Validierung für die Simulation in Produktion und Logistik*; Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, 2008

RDF Working Group: *Resource Description Framework*; 2004, <http://www.w3.org/RDF/>, Aufruf: 21.09.2010

REFA, Verband für Arbeitsstudien: *Methodenlehre des Arbeitsstudiums – Teil 1: Grundlagen*; 6. Auflage, Hanser Verlag, München 1978a

REFA, Verband für Arbeitsstudien: *Methodenlehre des Arbeitsstudiums – Teil 2: Datenermittlung*; 6. Auflage, Hanser Verlag, München 1978b

Reister, Dirk (Hrsg.): *Nachträge beim Bauvertrag*; Werner Verlag, München, 2004

Robinson, Stewart: *General concepts of quality for discrete-event simulation*. In: *European Journal of Operations Research*, Elsevier Verlag, Amsterdam, 2002, S. 103-117

Rohmert, Walter; Wakula, Jurij: *Analyse und Bewertung von Belastungen und Beanspruchungen bei der Bauarbeit als Determinanten berufstypischer Rückenbeschwerden bei Betonbauern und Verputzern*. Forschungsbericht, TH Darmstadt 1995

Rohmert, Walter; Wakula, Jurij; Landau, Kurt: *Gestaltung beanspruchungsgerechter Arbeitsmittel und Arbeitsobjekte in der Bauwirtschaft*. In: Landau; Linke-Kaiser (Hrsg.), *Aspekte der Sicherheit und Gesundheit bei Bauarbeiten*, Kolloquium des IAD und der Bau-Berufsgenossenschaft, 1996

Rohmert, Walter: *Das Belastungs-Beanspruchungs-Konzept*. In: *Zeitschrift für Arbeitswissenschaft*, ergonomia Verlag, Stuttgart, 1984

Ropohl, Günter: *Allgemeine Technologie*; 3. Auflage, Universitätsverlag Karlsruhe, Karlsruhe, 2009

Russel, Stuart; Norvig, Peter: *Künstliche Intelligenz – Ein moderner Ansatz*; Pearson Studium, München, 2. Auflage, 2004

Sack, Harald: *Vorlesung Semantic Web – Teil 11*, 2009, Hasso-Plattner-Institut Universität Potsdam, http://www.hpi.uni-potsdam.de/fileadmin/hpi/FG ITS/lecturenotes/Semantic_Web/sw0809-06.pdf, Aufruf: 12.11.2009

Sandoval-Wong, Alfredo; Schwarz, Jürgen: *Risikomanagement – Realität und Herausforderungen in der Bauindustrie*. In: *Festschrift 40 Jahre Institut für Baubetrieb und Bauwirtschaft*, Technische Universität Graz, Eigenverlag, 2009

Sargent, Robert: *Verification and Validation of simulation models*. In: Winter Simulation Conference Proceedings 1998, S. 121-130

Schaub, Karlheinz: *Das „Automotive Assembly Worksheet“ (AAWS)*. In: Landau, Kurt (Hrsg.): *Montageprozesse gestalten; ergonomia Verlag*, Stuttgart, 2004

Schlagbauer, Dieter: *Arbeitsbelastung und Arbeitsleistungskurven*. In: Tagungsband 21. Assistententreffen der Bereiche Bauwirtschaft, Baubetrieb und Bauverfahrenstechnik, TU Wien, IBB, Eigenverlag, 2010

Schlick, Christopher; Bruder, Ralph; Luczak, Holger: *Arbeitswissenschaft*; Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, 2010

Scholz, Benjamin: *Praxisanforderungen an Simulationswerkzeuge im Baubetrieb*; Diplomarbeit, TU Darmstadt, 2009

Schönbein, Rainer: *Agenten- und ontologiebasierte Software-Architektur zur interaktiven Bildauswertung*; Universitätsverlag Karlsruhe, 2005. Zugleich: Dissertation Universität Karlsruhe (TH)

Schulte-Zurhausen, Manfred: *Organisation*; Vahlen Verlag, München, 4. Auflage, 2005

Shafranovich, Yakof: *Common Format and MIME Type for CSV Files*; 2005, <http://tools.ietf.org/html/rfc4180>, Aufruf: 22.10.2009

Simmons, James: *Semantic Focus – Blog and Community* <http://www.semanticfocus.com/media/insets/semantic-web-layer-cake-2.png>, Aufruf: 05.07.2010

Smith, Michael; Welty, Chris; McGuinness, Deborah (Hrsg.): *OWL Web Ontology Language Guide*; 2004, <http://www.w3.org/TR/2004/REC-owl-guide-20040210/>, Aufruf: 21.09.2010

Stürmer, Markus: *Ein Beitrag zum Qualitätsmanagement im vorbeugenden baulichen Brandschutz*; Mensch & Buch Verlag, 2006. Zugleich: Dissertation, TU Darmstadt

Theodoropoulos, Georgis; Minson, Rob; Ewald, Roland; Lees, Michael: *Simulation Engines for Multi-Agent Systems*. In: *Multi-Agent Systems*, CRC Press, Boca Raton, 2009, S. 77-107

Tidwell, Doug: *XSLT – XML-Dokumente transformieren*; O'Reilly Verlag, Köln, dt. Ausg., 2003

Uschold, Mike; Gruninger, Michael: *Ontologies – principles, methods and applications*. In: The Knowledge Engineering Review, S. 93-136, Cambridge Journals, Cambridge, 1996, Vol. 11:2

Verein Deutscher Ingenieure: *Simulation von Logistik-, Materialfluß- und Produktionssystemen – Grundlagen*; VDI-Richtlinie, VDI 3633 Blatt 1, Dezember 1993

Vygen, Klaus; Schubert, Eberhard; Lang, Andreas: *Bauverzögerung und Leistungsänderung*; 5. Auflage, Werner Verlag, München, 2008

W3C OWL Working Group: *OWL 2 Web Ontology Language Document Overview*; W3C, 2009, <http://www.w3.org/TR/owl2-overview/>, Aufruf: 06.11.2009

W3C OWL Working Group: *OWL 2 Web Ontology Language Document Overview*; <http://www.w3.org/TR/2009/REC-owl2-overview-20091027/>, Aufruf: 03.02.2010

Wenzel, Sigrid; Weiß, Matthias; Collisi-Böhmer, Simone; Pitsch, Holger; Rose, Oliver: *Qualitätskriterien für die Simulation in Produktion und Logistik*; Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, 2008

Winzek, Götz: *Agentenbasierte Simulation der Baustellenlogistik*; Diplomarbeit, TU Darmstadt, 2010

Wooldridge, Michael: *An introduction to MultiAgentSystems*; Wiley Verlag, Chichester, 2002

Wooldridge, Michael; Jennings, Nicholas: *Intelligent Agents – Theory and Practice*. In: Knowledge Engineering Review, Cambridge University Press, Cambridge, 1995

Dissertationen des Instituts für Baubetrieb der Technischen Universität Darmstadt

Jahr	Verfasser	Referent und Korreferent	Titel der Dissertation
2010	Matthias Bergmann	Prof. Dr.-Ing. Christoph Motzko Prof. Dr.-Ing. Jürgen Schwarz	Ergonomiegestützte Multiagenten-simulation von Montageprozessen im Baubetrieb
2010	Ingo Giesa	Prof. Dr.-Ing. Christoph Motzko Prof. Dr.-Ing. Rainer Wanninger	Prozessmodell für die frühen Bauprojektphasen
2009	Nils Hinrichs	Prof. Dr.-Ing. Christoph Motzko Prof. Dr.-Ing. Hans-Joachim Linke	Strategien der öffentlichen Hand – Ein kompetenzorientierter Ansatz aus Sicht des Immobiliencontrollings
2009	Carola Maffini	Prof. Dr.-Ing. Christoph Motzko Prof. Dr.-Ing. Eberhard Schubert	Konfliktbehandlung in Bauprojektor- ganisationen
2009	Markus Demmler	Prof. Dr.-Ing. Christoph Motzko Prof. Dr.-Ing. Detlef Heck	Risikomanagement im internationalen Tunnelbau unter Anwendung der Vertragsform FIDIC Red Book
2008	Christoph Pflug	Prof. Dr.-Ing. Christoph Motzko Prof. Dr.-Ing. habil. Harald Schlemmer	Ein Bildinformationssystem zur Unterstützung der Bauprozesssteuerung
2008	Jens Elsebach	Prof. Dr.-Ing. Christoph Motzko Prof. Dr.-Ing. Eberhard Schubert	Bauwerksinformationsmodelle mit vollsphärischen Fotografien – Ein Konzept zur visuellen Langzeitarchivierung von Bauwerksinformationen
2007	Falk Huppenbauer	Prof. Dr.-Ing. Christoph Motzko Prof. Dr.-Ing. Eberhard Schubert	Nachunternehmermanagement: Die Entwicklung eines prozessorientierten Entscheidungsmodells für die Beschaffung und das Controlling
2007	Ali Akbar Elahwiesy	Prof. Dr.-Ing. Christoph Motzko Prof. Dr.-Ing. Eberhard Schubert	Multiprojektmanagement für Infrastruktur-Bauprojekte
2007	Torsten Fetzner	Prof. Dr.-Ing. Christoph Motzko Prof. Dr.-Ing. Eberhard Schubert	Ein Verfahren zur Erfassung von Minderleistungen aufgrund witterungsbedingter Bauablaufstörungen

Jahr	Verfasser	Referent und Korreferent	Titel der Dissertation
2007	Christopher Cichos	Prof. Dr.-Ing. Christoph Motzko Prof. Dr.-Ing. Eberhard Schubert	Untersuchungen zum zeitlichen Aufwand der Baustellenleitung
2007	Jörg Klingenberger	Prof. Dr.-Ing. Christoph Motzko Prof. Dr.-Ing. Detlef Heck	Ein Beitrag zur systematischen Instandhaltung von Gebäuden
2006	Helmuth Duve	Prof. Dr.-Ing. Christoph Motzko Prof. Dr.-Ing. Eberhard Schubert	Entscheidungshilfe zur Auswahl eines geeigneten Streitregulierungsverfahrens für das Bauwesen unter besonderer Berücksichtigung baubetrieblicher Aspekte
2006	Julia Schultheis	Prof. Dr.-Ing. Christoph Motzko Prof. Dr.-Ing. Eberhard Schubert	Public Private Partnership bei Stadthallen – Rahmenbedingungen und Gestaltungsmöglichkeiten in Deutschland
2006	Markus Stürmer	Prof. Dr.-Ing. Christoph Motzko Prof. Dr.-Ing. Eberhard Schubert	Beitrag zum Qualitätsmanagement im vorbeugenden baulichen Brandschutz – Untersuchung von ausgewählten Brandschutzmängeln der Ausführungsphase
2005	Ingo Goldenberg	Prof. Dr.-Ing. Christoph Motzko Prof. Dr.-Ing. Eberhard Schubert	Optimierung von Supply Chain Prozessen in der Bauwirtschaft durch mobile Technologien und Applikationen
2005	Jörg Huth	Prof. Dr.-Ing. Christoph Motzko Prof. Dr.-Ing. Eberhard Schubert	Baubetriebliche Analyse von selbstverdichtendem Beton
2005	Joachim Ruß	Prof. Dr.-Ing. Christoph Motzko Prof. Dr.-Ing. Eberhard Schubert	Ausführungsdauern und Kapazitätsplanung von Bauleistungen im Organisierten Selbstbau
2004	Shervin Haghsheeno	Prof. Dr.-Ing. Christoph Motzko Prof. Dr.-Ing. Eberhard Schubert	Analyse der Chancen und Risiken des GMP-Vertrags bei der Abwicklung von Bauprojekten
2004	Detlef Heck	Prof. Dr.-Ing. Eberhard Schubert Prof. Dr.-Ing. Christoph Motzko	Entscheidungshilfe zur Anwendung von Managementsystemen in Bauunternehmen
2004	Carsten Toppel	Prof. Dr.-Ing. Eberhard Schubert Prof. Dr.-Ing. Carl-Alexander Graubner	Technische und ökonomische Bewertungen verschiedener Abbruchverfahren im Industriebau
2004	Karl Bangert	Prof. Dr.-Ing. Eberhard Schubert Prof. Dr.-Ing. Christoph Motzko	Untersuchungen zum Einsatz von mit Seilen geführten Lastballon-Kransystemen (LTA Kran-Systeme) im Bauwesen
2002	Torsten Ebner	Prof. Dr.-Ing. Christoph Motzko Prof. Dr.-Ing. Eberhard Schubert	Bauen im Bestand bei Bürogebäuden

Jahr	Verfasser	Referent und Korreferent	Titel der Dissertation
2002	Patrick Büttner	Prof. Dr.-Ing. Eberhard Schubert Prof. Dr.-Ing. Christoph Motzko	Abbruch von Stahlbeton und Mauerwerksbauten – Entwicklung einer Entscheidungshilfe zur Auswahl von Hydraulikbaggern
2002	Marc Heim	Prof. Dr.-Ing. Christoph Motzko Prof. Dr.-Ing. Eberhard Schubert	Die zeitnahe Leistungsfeststellung von Baustellen unter besonderer Berücksichtigung von Bildinformationssystemen
2002	Alexander Glock	Prof. Dr.-Ing. Eberhard Schubert Prof. Dr.-Ing. Christoph Motzko	Technisch-wirtschaftliche Untersuchung luftschiffbasierter Schwerlastlogistik im Bauwesen
2001	Alexander Bubenik	Prof. Dr.-Ing. Christoph Motzko Prof. Dr.-Ing. Eberhard Schubert	Die Fassade und ihr Einfluss auf die schlüsselfertige Bauausführung
2001	Theresa Pokker	Prof. Dr.-Ing. Eberhard Schubert Prof. Dr.-Ing. Christoph Motzko	Kalkulation von Erdarbeiten in kontaminierten Bereichen
2001	Frank Müller	Prof. Dr.-Ing. Christoph Motzko Prof. Dr.-Ing. Eberhard Schubert	Marktstrategische Fremdvergabe unter Berücksichtigung entscheidungsrelevanter Einflusskriterien
2001	Markus Werner	Prof. Dr.-Ing. Christoph Motzko Prof. Dr.-Ing. Eberhard Schubert	Einsatzdisposition von Baustellenführungskräften in Bauunternehmen
2000	Bernhard Griebel	Prof. Dr.-Ing. Christoph Motzko Prof. Dr.-Ing. Eberhard Schubert Prof. Dr.-Ing. Gerhard Girmscheid	Der zeitnahe Soll-Ist-Vergleich aus Sicht der Baustelle
2000	Dirk Mayer	Prof. Dr.-Ing. Christoph Motzko Prof. Dr.-Ing. Eberhard Schubert	Entscheidungshilfe für die Beurteilung von Fußbodensystemen im Hochbau
1999	Patrik Loschert	Prof. Dr.-Ing. Eberhard Schubert Prof. Dr.-Ing. Christoph Motzko	Terminmanagement im schlüsselfertigen Hochbau
1999	Katja Silbe	Prof. Dr.-Ing. Eberhard Schubert Prof. Dr.-Ing. Christoph Motzko	Wirtschaftlichkeit kontrollierter Rückbauarbeiten
1999	Heinrich Wengerter	Prof. Dr.-Ing. Eberhard Schubert Prof. Dr.-Ing. Christoph Motzko	Rationalisierungsmöglichkeiten im Mauerwerksbau durch eine robotergetriebene Wandvorfertigungsanlage
1997	Achim Hitzel	Prof. Dr.-Ing. Eberhard Schubert Prof. Dr.-Ing. Christoph Motzko	Ein Entscheidungsunterstützungssystem für das Instandhaltungsmanagement der Bundesfernstraßenbrücken
1997	Peter Racky	Prof. Dr.-Ing. Eberhard Schubert Prof. Dr.-Ing. Christoph Motzko	Entwicklung einer Entscheidungshilfe zur Festlegung der Vergabeform
1996	Carsten Dorn	Prof. Dr.-Ing. Eberhard Schubert Prof. Dr. jur. Klaus Vygen	Systematisierte Aufbereitung von Dokumentationstechniken zur Steuerung von Bauabläufen und zum Nachweis von Bauablaufstörungen

Jahr	Verfasser	Referent und Korreferent	Titel der Dissertation
1995	Egbert Keßler	Prof. Dr.-Ing. Eberhard Schubert Prof. Dr.-Ing. Thomas Bock	Rationalisierung im Schalungsbau durch Einsatz von Robotern
1995	Hermann Kraft	Prof. Dr.-Ing. Eberhard Schubert Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. e.h. Gert König	Steuerung und Entwicklung von Brückenerhaltungsmaßnahmen
1995	Friedo Mosler	Prof. Dr.-Ing. Eberhard Schubert Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. e.h. Gert König	Wirtschaftliche Instandhaltung von Betonaußenbauteilen
1994	Stefan Plaum	Prof. Dr.-Ing. Eberhard Schubert Prof. Dr.-Ing. Hans-Peter Lühr	Umweltrelevante organisatorische Anforderungen an Betriebe der Bauwirtschaft – Lösungsmöglichkeiten, aufgezeigt am Beispiel der Baurestmassenbehandlung
1994	Boming Zhao	Prof. Dr.-Ing. Eberhard Schubert Prof. Dr.-Ing. Volker Kuhne	Ein Verfahren zur Entwicklung eines wissensbasierten Planungssystems für die Terminplanung von Rohbauprojekten im Hochbau
1993	Hellwig Kamm	Prof. Dr.-Ing. Eberhard Schubert Prof. Dr.-Ing. Reinhard Seeling	Materialwirtschaftliche Steuerung im Baubetrieb, Analyse und Verbesserung baubetrieblicher Beschaffungsvorgänge
1991	Henning Hager	Prof. Dr.-Ing. Eberhard Schubert Prof. Dr.-Ing. Claus Jürgen Diederichs	Untersuchung von Einflussgrößen und Kostenänderungen bei Beschleunigungsmaßnahmen von Bauvorhaben
1991	Michael Hölzgen	Prof. Dr.-Ing. Eberhard Schubert Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. e.h. Gert König	Erhaltungskosten von Brücken
1990	Dirk Reister	Prof. Dr.-Ing. Eberhard Schubert Prof. Dr. rer. pol. Karl Robl	Entwicklung eines Verfahrens zur projektübergreifenden Personaleinsatzoptimierung
1989	Gerd Bergweiler	Prof. Dr.-Ing. Eberhard Schubert Prof. Dr.-Ing. Eberhard Petzschmann	Strukturmodell zur Darstellung und Regeneration von Kalkulationsdaten
1989	Lothar Forkert	Prof. Dr.-Ing. Eberhard Schubert Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. e.h. Gert König	Verfahren zur Prognose von Schadensentwicklungen bei einer kostenoptimierten Brückeninstandhaltung
1989	Christoph Motzko	Prof. Dr.-Ing. Eberhard Schubert Prof. Dipl.-Ing. Klaus Simons	Ein Verfahren zur ganzheitlichen Erfassung und rechnergestützten Einsatzplanung moderner Schalungssysteme
1989	Lothar Ruf	Prof. Dr.-Ing. Eberhard Schubert Prof. Dipl.-Ing. Hansjakob Führer	Integrierte Kostenplanung von Hochbauten
1988	Karl Rose	Prof. Dr.-Ing. Eberhard Schubert Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. e.h. Gert König	Kosten der Erhaltung von Brückenbauwerken

Jahr	Verfasser	Referent und Korreferent	Titel der Dissertation
1987	Andreas Lang	Prof. Dr.-Ing. Eberhard Schubert Prof. Dr.-Ing. Hans-Gustav Olshausen	Ein Verfahren zur Bewertung von Bauablaufstörungen und Projektsteuerung
1986	Lothar Krampert	Prof. Dr.-Ing. Eberhard Schubert Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. e.h. Gert König	Der Einfluss von Arbeitseinsatz und Arbeitstakt auf die Kosten von Hochbauten in Ortbeton
1985	Herrmann Keßler	Prof. Dr.-Ing. Eberhard Schubert Prof. Dr.-Ing. Wolfram Keil	Der Plan Soll-Ist-Vergleich mit einem Nachweis zeitvariabler Kostenänderung bei einer Bauzeitverschiebung